



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

CHŮZE JAKO ALTERNATIVNÍ ZDROJ ELEKTRICKÉ ENERGIE

WALKING AS ALTERNATIVE SOURCE OF ELECTRICAL ENERGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN SMILEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK HADAŠ, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Smilek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Chůze jako alternativní zdroj elektrické energie

v anglickém jazyce:

Walking as alternative source of electrical energy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V posledních letech rozvoj mobilních technologií předběhl možnosti současných baterií a vzešel požadavek na vývoj nového pokud možno nevyčerpatelného zdroje elektrické energie pro nejrůznější mobilní aplikace. Jednou z možností je využití energie při chůzi a běhání, kterou lze transformovat na elektrickou energii pro mobilní aplikace.

Cíle bakalářské práce:

1. Vypracujte rešeršní studii fyzikálních principů a možných konstrukcí.
2. Vytvořte energetickou rozvahu pro generování elektrické energie a analyzujte měření zrychlení během lidského pohybu.
3. Zhodnoťte energii chůze a běhu jako potencionální energetický zdroj pro generování elektrické energie.
4. Vyberte vhodný fyzikální princip a zvolte koncepci konstrukce generátoru pro nejvhodnější umístění zařízení.

Seznam odborné literatury:

Priya S, Inman DJ: Energy Harvesting Technologies. Springer US, 2009.

Hadaš, Z.: Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava, Disertační práce, FSI, VUT v Brně, 2007.

Brepta a kol.: Mechanické kmitání, Sobotáles, Praha, 1994.

Měřička, J., Zoubek, Z.: Obecná teorie elektrického stroje, SNTL, Praha, 1973.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 16.11.2010

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou využití principu energy harvesting pro generování elektrické energie z lidské chůze. Je provedeno vlastní měření zrychlení na různých částech lidského těla během chůze, na jehož základě je v programu MATLAB/Simulink vypracována energetická rozvaha, která jednoznačně určuje možnosti a limity vibračního generátoru pro použití v této aplikaci. Ze závěrů, vyplývajících z energetické rozvahy, jsou stanoveny požadavky na vyvíjený generátor a rozebráno, popřípadě simulačně otestováno, několik koncepčních návrhů vibračního generátoru, pracujícího na frekvenci blízké 2 Hz při hodnotách zrychlení 0,3 g.

ABSTRACT

This thesis deals with problematics of using the Energy Harvesting principles for generating power from the human walking. Own acceleration measurement during walking was made on various locations of human body to provide data for self-developed MATLAB/Simulink energy balance script. The script clearly sets the possibilities and limits of vibration generator used in this application. Conclusions of the energy balance were used to specify requirements for development of vibration generator and few possible conceptions, working on frequencies close to 2 Hz and acceleration amplitudes 0,3 g, were presented, or simulated.

KLÍČOVÁ SLOVA

vibrace, Energy Harvesting, vibrační generátor, chůze, elektromagnetická indukce

KEYWORDS

vibrations, Energy Harvesting, vibration generator, walking, electromagnetic induction

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SMILEK, J. *Chůze jako alternativní zdroj elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, za pomoci vedoucího práce a s použitím literatury a dalších uvedených zdrojů.

v Brně dne

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za jeho ochotu, čas a neocenitelné rady v průběhu řešení této práce.

OBSAH

1 ÚVOD	13
2 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ	15
3 REŠERŠNÍ STUDIE	17
3.1 Energy Harvesting z lidské chůze	17
3.2 Principy zisku elektrické energie z jiné formy energie	18
3.3 Existující konstrukce generátorů, využívající energii lidské chůze	20
4 VOLBA METOD ŘEŠENÍ	27
5 ANALÝZA MOŽNOSTÍ VIBRAČNÍHO GENERÁTORU	29
5.1 Obecný vibrační generátor	29
5.2 Měření zrychlení při chůzi	30
5.3 Energetická rozvaha	34
5.4 Spotřeba soudobých přenosných elektronických zařízení	36
5.5 Použitelnost vibračního generátoru pro zadanou aplikaci	36
5.6 Ověření výkonu vibrační baterie	37
6 NÁVRH VIBRAČNÍHO GENERÁTORU	39
6.1 Požadavky na přenosný vibrační generátor	39
6.2 Základní koncepce	39
6.3 Mechanické vedení	40
6.4 Zahrnutí vlivu třecí síly na odezvu soustavy	40
6.5 Konstrukce rezonančního mechanismu a cívky	42
6.6 Jiné konstrukce magnetického obvodu	48
7 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A NÁMĚTY NA DALŠÍ VÝZKUM	51
8 ZÁVĚR	53
9 REFERENCE	55
10 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	59
11 SEZNAM PŘÍLOH NA CD	61

1 ÚVOD

S postupující miniaturizací elektroniky dochází v posledních letech k velmi rychlému rozvoji mobilních elektronických zařízení. Tyto přístroje, jako jsou mobilní telefony, multimediální přehrávače, nebo třeba outdoorové GPS navigace, jsou stále výkonnější, což s sebou nevyhnutelně nese nutnost zajistit pro ně vhodný zdroj elektrické energie. V současné době využívané napájení pomocí baterií je limitováno jak omezenou kapacitou těchto baterií a tedy nutností jejich častého dobíjení, tak životností chemických článků a jejich poměrně vysokou hmotností. Vystává tak potřeba nového, pokud možno nevyčerpatelného zdroje energie. Jedním ze způsobů, jak zajistit napájení (nejen) přenosných přístrojů, je využít energie, získané z okolí daného přístroje. U mobilních aplikací se tak přímo nabízí využít možnosti získání elektrické energie z chůze, popřípadě běhu.

Způsob získávání energie z okolního prostředí je označován pojmem Energy Harvesting, Power Harvesting, nebo Energy Scavenging. Princip získávání energie z okolního prostředí je samozřejmě možné využít v celé řadě dalších nízko energetických aplikací, u kterých je použití bateriového napájení nevhodné, nebo z jakéhokoli důvodu nemožné. Energy Harvesting tedy najde uplatnění v širokém spektru oborů, od napájení mobilních aplikací a bezdrátových senzorů, přes autonomní přístroje ve strojírenství a v letectví, až třeba po napájení lékařských přístrojů v lidském těle.

Pro každou aplikaci je potřeba zajistit dostatečně výkonný a spolehlivý zdroj okolní energie. Tím může být například teplotní gradient, sluneční nebo elektromagnetické záření, okolní vibrace, a také lidská činnost. Energií získanou z těchto zdrojů je pak potřeba pomocí vhodného fyzikálního principu převést na energii elektrickou, použitelnou pro napájení požadované aplikace. Ve většině současných případů slouží princip Energy Harvesting pouze jako sekundární napájení, takže takto vyrobená energie je akumulována v bateriích nebo ultrakapacitoru. V blízké budoucnosti lze očekávat, že využití Energy Harvestingu poslouží i jako primární napájení pro bezdrátové senzory a jiné nízkoenergetické aplikace.

Tato bakalářská práce se zabývá možností využití energie, získané z lidské chůze, k napájení elektronických zařízení denní potřeby, jako jsou například mobilní telefony, MP3 přehrávače, hodinky a podobně. Výstupem této práce je zhodnocení použitelnosti mikrogenerátoru pro zadanou úlohu, založené na vlastním měření a interpretaci výsledků, a návrh vibračního mikrogenerátoru. Ten by měl být schopen generovat z vibrací, vznikajících při chůzi, takové množství elektrické energie, aby to postačovalo k napájení malých mobilních elektronických zařízení, nebo aspoň k výraznému prodloužení životnosti jejich baterie na jedno nabití.

2 FORMULACE PROBLÉMU A CÍLE ŘEŠENÍ

Možnosti napájení spotřební elektroniky pomocí zabudovaných akumulátorů mají jistá omezení. Proto se dá očekávat zvyšující se poptávka po jiných než chemických zdrojích energie pro napájení těchto přístrojů. Energy harvesting v tomto případě nabízí zajímavou alternativu nevyčerpatelného zdroje elektrické energie, získané konverzí z kinetické energie pohybujícího se člověka. Pro samotného uživatele to ve většině případů neznamena příliš velké zhoršení osobního komfortu, a za cenu jednoho přídavného zařízení tento získá určitou nezávislost na lokální elektrické síti, kterou by jinak potřeboval pro dobíjení akumulátorů svých přístrojů. To může být velkou výhodou například v odlehlých oblastech s omezeným nebo chybějícím přístupem k elektrické síti, nebo třeba ve vojenských aplikacích.

Úkolem této práce je analyzovat současný stav na poli zařízení, schopných generovat energii z lidské chůze, zhodnotit reálné možnosti takových generátorů, a na základě vlastních měření rozhodnout o vhodnosti umístění mikrogenerátoru na lidské tělo a jeho použitelnosti k napájení spotřební elektroniky. Dále je úkolem vybrat vhodný fyzikální princip, a na jeho základě se pokusit vyvinout a simulačně namodelovat generátor, který by byl schopný fungce v podmínkách, daných povahou požadované aplikace. Při návrhu je třeba brát v úvahu omezení, plynoucí jak z podstaty zvoleného funkčního principu, tak z požadavku na dostatečné pohodlí uživatele. To zamezuje vývoji generátoru nepřiměřených rozměrů a/nebo hmotnosti, které by sice mohly být perfektně funkční, ale byly by v praxi jen obtížně použitelné. Na druhou stranu musí být zkonstruovaný generátor schopen vyvinout dostatečný výkon k napájení osobních elektronických spotřebičů. Měl by umožňovat například udržovat mobilní telefon v pohotovostním režimu po neomezeně dlouhou dobu, a pokud možno, měl by být schopen i v tomto případě ještě navíc dobíjet baterii telefonu pro uskutečnění případného hovoru.

3 REŠERŠNÍ STUDIE

3.1 Energy Harvesting z lidské chůze

V článku [10] jsou zařízení pro Energy Harvesting všeobecně rozdělena podle dvou základních kritérií. Je možno brát v úvahu buď zdroj, ze kterého je energie získávána, nebo typ energie, který je využit ke konverzi na elektrickou energii.

Dle prvního kritéria rozlišujeme dvě základní skupiny. V jedné z nich jsou zařízení, která pro výrobu elektrické energie využívají část energie, získané z uživatele vlastního zařízení, ať už člověka, nebo i zvířete (např. pro napájení zařízení, monitorujícího pohyb divokých zvířat). Tato zařízení jsou známa pod pojmem Human Energy Devices [12]. Druhou skupinu pak tvoří zařízení, využívající k energetické přeměně volnou energii z okolního prostředí.

Další způsob klasifikace podle typu konvertované energie pak rozlišuje tři druhy původní energie, která poslouží ke konverzi na energii elektrickou. Jsou jimi: kinetická energie, energie elektromagnetického záření (zahrnuje i světelné záření) a tepelná energie (Tab. 1).

Zdroj energie	Typ využitelné energie
Člověk	Kinetická, Tepelná
Okolní prostředí	Kinetická, Tepelná, Záření

Tab. 1 Využitelné typy energie pro energy harvesting. [12]

Díky zaměření této práce se budeme nadále zabývat především využitím energie lidského těla. Pro zařízení, využívající energii z lidského zdroje jsou využitelné pouze dvě z uvedených forem energie: kinetická a tepelná. Je však možno dále rozlišit, zda byla tato energie získána cílenou aktivitou (v takovém případě mluvíme o energii z aktivního lidského zdroje), nebo jestli pochází z aktivit člověka, které nejsou cíleně zaměřeny na získání energie (pasivní zdroje). Mezi typická zařízení, využívající aktivní lidskou energii patří například známé „natahovací“ rádia a ruční svítilny, které fungují pouze tehdy, pokud je uživatel nabije točením kliky nebo třepáním.

Je mnoho možností, jak zachytit a využít pasivní energii, kterou člověk při své každodenní činnosti produkuje. Jedno z prvních komerčních využití pasivního lidského zdroje je napájení energeticky nenáročného hodinového strojek pomocí energie, vzniklé při pohybu rukou (SEIKO Kinetic, 1988). Na myšlenku využití lidské energie firma SEIKO navázala o deset let později, kdy představila první hodinový strojek, nazvaný SEIKO Thermic, napájený pomocí teplotního gradientu mezi lidským tělem a okolním prostředím (Seebeckův jev).

Vzhledem k tomu, že chůze je jedna z nejčastějších lidských činností, je často zmiňovaným příkladem snaha o integrování některého typu mikrogenerátoru do podrážky boty. Podle některých výpočtů se energie, generovaná člověkem o váze 68 kg při jediném kroku se zvednutím paty o 5 cm, pohybuje okolo 67 W [15]. Pokud by bylo možné aspoň část této energie uschovat, byl by získán zdroj, schopný napájet elektronická zařízení i době, kdy se uživatel zrovna nepohybuje.

Jiným způsobem získání elektrické energie z pasivního lidského zdroje je využití vibrací, které při chůzi vznikají. Tohoto jevu využívající vibrační generátory nejsou tolik omezeny velikostí a hmotností, jako generátory v botě, a navíc mohou být implementovány do některých předmětů denní potřeby, jako je například batoh.

Další metody využití pasivního lidského zdroje zahrnují využití pohybu hrudního koše při dýchání, nebo třeba energie z proudění krve v těle [15].

3.2 Principy zisku elektrické energie z jiné formy energie

Kinetická energie je nejdostupnějším zdrojem energie z pohybu lidského těla. Tato kapitola stručně popisuje realizovatelné způsoby získání a přeměny kinetické energie na energii elektrickou. Existují dva možné způsoby zachycení kinetické energie.

Jeden reaguje na buzení kinetickou energií vibrací nebo posuvem části mechanismu generátoru. Energie, takto získaná k přeměně, přitom závisí na hmotě mechanismu. Velká část generátorů využívá vibrační rezonanční mechanismus, který je nejúčinnější v blízkosti rezonanční frekvence.

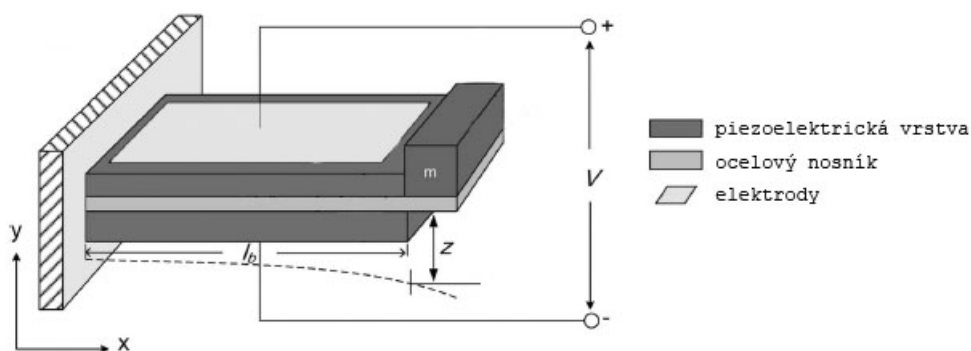
Jiný způsob spočívá ve využití vnějšího zatížení k vytvoření deformace, která je přeměněna na elektrickou energii pomocí piezoelektrického materiálu. V tomto případě získaná energie nemusí záviset na hmotnosti mechanismu, nýbrž na velikosti deformace [15].

K převodu kinetické energie na elektrickou lze využít následujících fyzikálních principů:

- piezoelektrický jev
- elektrostatická přeměna
- elektromagnetická indukce

3.2.1 Piezoelektrický generátor

Piezoelektrický efekt objevili v roce 1880 bratři Jacques a Pierre Curieovi. Bylo zjištěno, že určité materiály vykazují při mechanickém zatížení elektrickou polarizaci, jejíž velikost je přímo úměrná velikosti zatížení. Tohoto jevu lze s úspěchem využít při přeměně kinetické energie v elektrickou. Piezoelektrický materiál, jehož nejpoužívanějšími typy jsou PVDF (Polyvinylidenefluorid) a PZT (Plumbum Zirconate Titanate), může být vybuzen několika způsoby, například stlačováním nebo ohýbáním.



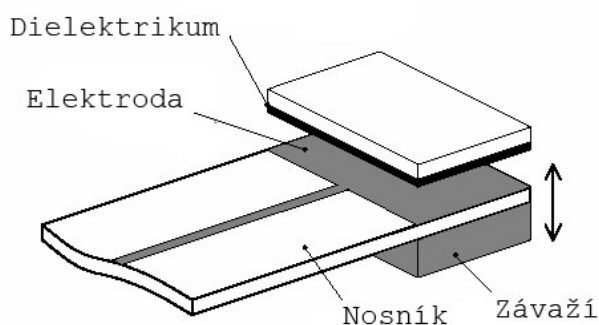
Obr. 1 Schéma piezoelektrického generátoru buzeného vibracemi [7]

Generátor, využívající piezoelektrického efektu, je nejčastěji tvořen vetknutým nosníkem z piezokeramiky, popřípadě z oceli, přičemž piezokeramický plát je na nosníku pevně uchycen. Takový generátor může být využit pro buzení pomocí vibrací, přičemž nosník tvoří tuhost mechanismu k , který společně s připevněnou zátěží o hmotnosti m tvoří rezonanční mechanismus. Při vybuzení vibracemi tento mechanismus deformuje uchycenou destičku z piezokeramického materiálu, v důsledku čehož je v ní generováno elektrické napětí u . Podobná konstrukce je použitelná i pro buzení pomocí vnějšího zatížení. U tohoto typu ale není potřeba rezonančního mechanismu, takže odpadá nutnost použití zátěže m . Využití generátorů, pracujících s piezoelektrickými materiály, poskytuje

většinu výhod, nabízených indukčními a elektrostatickými konvertory energie, navíc zaručuje velkou odolnost systému. Na druhou stranu se piezoelektrické konvertory jen těžko miniaturizují, takže jejich implementace do mikrosystémů může být poměrně obtížná.

3.2.2 Elektrostatický generátor

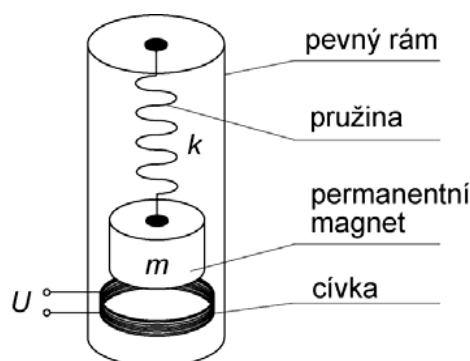
Principem elektrostatického generátoru je využití relativního pohybu dvou elektrod, oddělených pomocí dielektrika (kondenzátor). U známých konstrukcí je relativní pohyb vyvolán rezonančním mechanismem, vybuzeným vibracemi z okolí. V článku [12] jsou představeny dva různé návrhy: kapacitor s konstantním elektrickým nábojem, a kapacitor s konstantním napětím. Oba tyto generátory jsou založeny na elektrostatickém tlumení. U návrhu s konstantním nábojem je změna napětí realizována pomocí změny elektrické kapacity, tj. změnou vzdálenosti mezi elektrodami. Návrh, pracující s konstantním napětím, zajišťuje změnou vzájemné vzdálenosti elektrod změnu elektrického náboje. Ačkoli je celková energie získaná z generátoru s konstantním napětím vyšší, nevýhodou tohoto návrhu je nutnost použití zdroje elektrického napětí pro generování výkonu. Při vhodné volbě konstrukce je elektrostatický generátor vhodný pro výrobu elektrické energie v MEMS zařízeních. Limitujícím faktorem však zůstává nutnost použití zdroje napětí, který nabije generátor pro spuštění přeměny energie z kinetické na elektrickou.



Obr. 2 Náčrtek jednoduchého elektrostatického vibračního generátoru [6]

3.2.3 Elektromagnetický generátor

Elektromagnetický generátor je založen na Faradayově zákonu elektromagnetické indukce. Umístění vodiče v proměnlivém magnetickém poli způsobuje indukci elektrického napětí U ve vodiči. Proměnlivé magnetické pole může být zajištěno pohyblivým permanentním magnetem, nebo pohyblivým vodičem vůči magnetu. Řešení s pohyblivým magnetem je ovšem konstrukčně výhodnější, neboť tak odpadá nutnost připojení pohyblivého vodiče k elektrickému obvodu. Důležitým faktorem je velikost změny magnetického toku, procházejícího vodičem (cívkou).



Obr. 3 Princip elektromagnetického generátoru buzeného vibracemi. Převzato z [6]

Proto je třeba vhodně zvolit uspořádání magnetu v obvodu tak, aby co největší možný magnetický tok procházel velkou plochou průřezu vodiče, tj. co největším počtem závitů cívky. Z toho plyne, že větší generátory s delší cívkou budou dosahovat lepších výsledků, než malé generátory [6].

3.3 Existující konstrukce generátorů, využívající energii lidské chůze

V uplynulých letech se v světě objevila zajímavá konstrukční řešení generátorů elektrické energie, využívajících ke své funkci energii, získanou z lidské chůze. Cílem této kapitoly v žádném případě není uvést kompletní škálu existujících patentů a řešení, nýbrž představit některé zajímavé konstrukce a uvést výhody, popřípadě i nevýhody daného řešení.

3.3.1 nPower PEG

Na trhu se objevilo několik vibračních generátorů, určených pro napájení spotřební elektroniky. Jedním z nich je přístroj, nazvaný nPower PEG. Z dostupných údajů je zřejmé, že se jedná o vibrační generátor s integrovanou akumulátorovou baterií, který využívá principu elektromagnetické indukce ke získání elektrické energie. Výrobce [27] uváděný výkon je až 2,5 W, ale v tomto případě se zjevně jedná o výstupní výkon integrovaného akumulátoru, nikoli samotného generátoru. Výrobce totiž dále uvádí, že cca 10 minut chůze postačuje k napájení iPhone 3G po dobu jednodominutového hovoru.



Obr. 4 Kapesní generátor nPower PEG a jeho patentní schéma [27]

Hmotnost celého zařízení má být těsně pod 340 gramů, což při uvážení hmotnosti baterie a titanového pouzdra naznačuje, že skutečný výkon generátoru se bude pohybovat maximálně v řádu desítek miliwattů. Na druhou stranu, nízká hmotnost a relativně malé rozměry (délka 280 mm, největší průměr 38 mm) zaručují dobrou umístitelnost například v batohu.

nPower PEG se skládá z dutého tubusu, v němž se recipročně pohybuje permanentní magnet, uchycený pružinami a vedený lineárním vedením v ose tubusu. V prostřední rozšířené části tubusu je navinuta cívka, ve které se pohybem magnetu indukuje napětí. Rezonanční obvod je naladěn na frekvenci 2 Hz, což je podle výrobce průměrná frekvence lidské chůze. Podle dostupných informací není možné změnit rezonanční frekvenci (bez rozložení zařízení a výměny součástí rezonančního obvodu), takže při rychlejší chůzi, popřípadě běhu bude účinnost s velkou pravděpodobností dramaticky klesat.

3.2.2 Vibrační baterie

Dalším, v principu velmi podobným přístrojem je “Vibrační baterie” společnosti Brother Industries, inc. Mikrogenerátor velikosti standardní AA baterie opět pracuje na principu elektromagnetické indukce. Elektrická energie, vyrobená v generátoru je použita k nabití kapacitoru, který je umístěn buď v jednom pouzdru s generátorem, nebo v externím pouzdru opět velikosti AA článku. Generátor má postačovat k napájení přístrojů o příkonu do 100 mW. Podle některých zdrojů [25] se výkon generátoru pohybuje mezi 10 a 180 mW při frekvenci budících vibrací 4 až 8 Hz. Podobný generátor je nabízen i ve velikosti AAA baterie. Výrobce bohužel neuvádí podrobnosti o konstrukci rezonančního obvodu. Dalo by se namítnout, že tento generátor není primárně určen pro generování el. energie z lidské chůze, ale z důvodu udávaných velmi vysokých výkonů bylo rozhodnuto o jeho zařazení do této práce a simulačním ověření možných parametrů.



Obr. 5 Vibrační baterie velikosti AA s kapacitorem v externím pouzdru [25]

3.2.3 Lightning pack

Zajímavým nápadem se zdá být využití kmitání batohu při chůzi. Generátor, integrovaný do rámu batohu, představili výzkumníci z Philadelphské University of Pennsylvania. Zatímco samotný princip rotačního generátoru, založeného na elektromagnetické indukci, není nijak převratný, využití relativního pohybu batohu vzhledem k jeho nositeli během chůze stojí za pozornost. Pointa spočívá v umístění nesené užitečné hmotnosti na konstrukci, která je s rámem a popruhy batohu spojena pomocí pružin. Díky těmto pružinám následuje hmota batohu přirozený pohyb boků během chůze, ovšem s malým zpožděním. Tím je dosaženo vzájemného relativního pohybu mezi nákladem a nosičem. Kmitání nákladu je pak převedeno do generátoru, kde je přeměněno v elektrickou energii pomocí rotace cívek rotoru v magnetickém poli statoru generátoru. Výkon generátoru závisí na rychlosti chůze a hmotnosti nákladu, maximální hodnota naměřená během experimentu se zátěží 45 kg dosáhla 7,4 W [5]. Podle účastníků testování neměl pohyb batohu na zádech negativní vliv na komfort chůze, což je možno považovat za velkou výhodu. Dalším kladem je poměrně velký výkon generátoru, jehož účinnost neklesá s měnící se frekvencí budících kmitů.



Obr. 6 Schéma generátoru, integrovaného do rámu batohu [23]

3.2.4 Piezoelektrické popruhy batohu

Jiný způsob využití pohybu hmoty batohu byl představen v článku [5]. Návrh využívá mechanického napětí, vznikajícího v popruzích batohu při chůzi, pro generování elektrické energie pomocí piezoelektrické vrstvy na popruhu. Hlavní výhodou této myšlenky je, že nijak neovlivní komfort uživatele, v podstatě stačí vyměnit popruhy batohu za jiné, opatřené piezoelektrickou vrstvou. Právě výběr materiálu, schopného vydržet velké deformace, vznikající v popruhu při nesení plně zatíženého batohu, byl jedním z největších problémů tohoto konceptu. Řešení se dostavilo v podobě vývoje nanokompozitního piezoelektrického materiálu, nazvaného „Metal Rubber“, který si při 1000% deformaci udrží vodivost a po odlehčení se vrátí do původního tvaru. Pro největší zisk energie je třeba, aby popruh byl co nejdelší. Toho bylo docíleno použitím dvou smyčkových popruhů, protažených vzadu skrz rám batohu. V této konfiguraci bylo dosaženo maximálního výkonu 345 mW, a průměrného výkonu 45,6 mW v průběhu celé simulace,

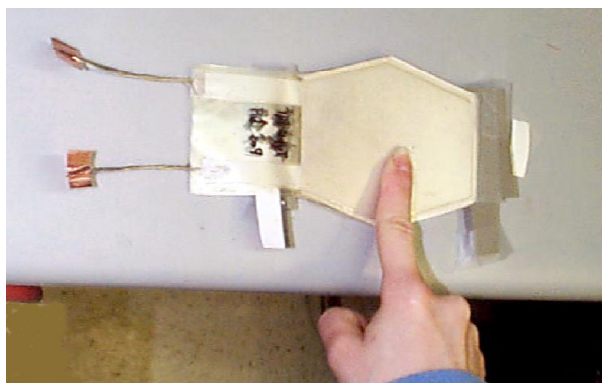
opět se zátěží 45 kg [5]. Takový výkon je dostatečný pro napájení některých malých spotřebičů, jako je například LED svítidla, nebo iPod Nano.



Obr. 7 Popruhy batohu s piezoelektrickou vrstvou [5]

3.2.5 Generátor v botě

Logickým řešením, jak vyrobit elektrickou energii z chůze je integrace mikrogenerátoru přímo do boty uživatele. Způsobů integrace generátoru do běžné obuvi byla vyzkoušena celá řada, počínaje piezoelektrickými vložkami do bot, přes umístění piezoelektrického materiálu do podpatku, konče například elektrostatickým generátorem, opět umístěným v podpatku boty [15, 16]. Všechny tyto konstrukce využívají deformace boty, vznikající při chůzi, ke generování elektrické energie. Výhodou prvního zmíněného řešení, tedy piezoelektrické vložky do boty, je fakt, že materiál PVDF je snadno nařezatelný na požadovaný tvar, a navíc je poměrně odolný. Tyto vlastnosti umožňují relativně snadno nahradit tradiční vložku do boty vložkou, vyrobenou z PVDF, bez nutnosti obuv dramaticky upravovat. Experimentální generátor této konstrukce, umístěný do pánské boty velikosti 11,5 dosáhl průměrného výkonu 1,3 mW [15]. Nejvyšší naměřený výkon byl 15 mW při frekvenci chůze 1 krok za sekundu a s použitou ohmickou zátěží 250 Ω . Stejněho funkčního principu využívající generátor, umístěný v podpatku boty, dosáhl vyššího maximálního výkonu (60 mW), avšak kvůli malému časovému úseku, při kterém dochází k deformaci podpatku, byl jeho průměrný výkon pouze 1,8 mW [15]. Pokusný



Obr. 8 První prototyp piezoelektrické vložky do boty [11]

generátor, integrovaný do podpatku boty a využívající elektrostatické přeměny energie, byl vyvinut v rámci iniciativy agentury DARPA (Defence Advanced Research Project Agency), s využitím materiálů, zvaných elektroaktivní polymery, nebo dielektrické elastomery. Jeho principem je stlačování nabitých elektroaktivních polymerů při došlapu, generující elektrickou energii. Udávaný výkon je až 800 mW při rychlosti chůze 2 kroky za sekundu. Zvětšením pracovního zdvihu generátoru z aktuálních 3 mm na 5-9 mm chtějí tvůrci u komerčních sériových výrobků dosáhnout generovaného výkonu až 1 W.



Obr. 9 Příklad elektrostatického generátoru v podpatku boty [13]

3.2.6 Piezoelektrický chodník

Využití energie z chůze nemusí spočívat jen v napájení osobních elektronických zařízení. Principiálně stejný piezoelektrický generátor, jako v předcházejícím odstavci, zabudovaný ovšem do chodníku (železničního přejezdu, silnice atd.) namísto do podrážky boty, může sloužit k napájení například pouličního osvětlení, nebo třeba turniketů ve stanicích metra a železnice. Tato implementace byla úspěšně vyzkoušena v Japonsku [30], a objevilo se také několik firem, nabízejících produkty založené na této myšlence [28, 29].



a) turnikety s piezoelektrickou podlahou [30]



b) piezoelektrická dlaždice [29]

Obr. 10 Piezoelektrické generátory integrované do chodníku

3.2.7 Biomechanical energy harvester

Další možností zisku elektrické energie z chůze je obdoba takzvaného rekuperačního brzdění, používaného v automobilovém průmyslu. Generátor, pracující na tomto principu byl představen výzkumným týmem ze Simon Fraser University v Britské Columbii. Zařízení, které vzhledově připomíná běžnou kolenní ortézu, využívá fáze napínání nohy v koleni při chůzi ke generování elektřiny pomocí rotačního elektromagnetického generátoru a zároveň tím brzdí rotaci nohy v koleni, což vede ke snížení svalové zátěže. Aby se předešlo naopak zvýšenému namáhání svalů, pracuje zařízení pouze v poslední fázi kroku, ovšem za cenu menšího celkového výkonu. Podle experimentálních výsledků je výkon zařízení cca 2,5 W při normální chůzi a až 6,5 W během rychlé chůze. Vzhledem k možnosti nést na každé noze jedno zařízení je pak celkový výkon dvojnásobný. Otázkou ovšem je, jestli nemůže případné dlouhodobé používání podobného zařízení, které usnadňuje práci určitým svalům, vést k oslabení, popřípadě atrofování těchto svalů.



Obr. 11 Kolenní ortéza s integrovaným generátorem [24]

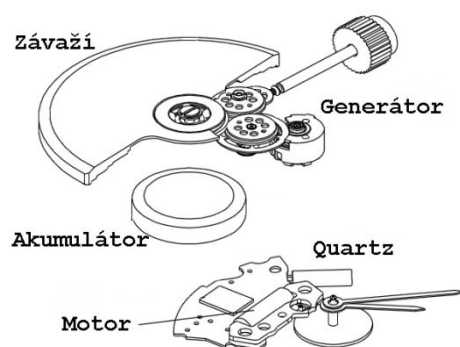
3.2.8 „Chytré“ textilie

O generování elektrické energie z běžného oblečení se snaží výzkumný tým z britské University of Southampton. Principem má být nanesení aktivního filmu vodivého inkoustu na textilii, což by umožnilo získávat elektrickou energii z deformací oblečení při chůzi. Velkou výzvou tohoto projektu je vyřešení problému odolnosti této „chytré“ textilie při praní. Za předpokladu úspěšného dokončení by tato technologie měla najít využití jak ve zdravotnictví (pro napájení zdravotních monitorovacích přístrojů), tak ve spotřební sféře. Vzhledem k ranému stádiu výzkumu (započato v říjnu 2010) bohužel není k dispozici více informací [26].

3.2.9 Samonatahovací hodinky

Napájení hodinek je díky jejich nízké spotřebě jedním z prvních komerčně využitých způsobů energy harvesting z lidské chůze. První samonatahovací hodinky byly zaznamenány již v roce 1770, i když v té době samozřejmě šlo pouze o mechanicky poháněný hodinový strojek. Princip zisku kinetické energie z chůze se od těch dob příliš nezměnil, pouze byl změněn způsob uchování shromážděné energie a její forma. Díky

pohybu ruky při chůzi, i při každodenních činnostech, dochází k rotaci setrvačné hmoty (závaží) uvnitř hodinek. Tato hmota je pak propojena s mikrogenerátorem, který mění kinetickou energii na elektrickou. Propojení může být realizováno jak přímo (Seiko AGS), nebo přes mechanickou pružinu, která se nejprve natáhne pohybem závaží, a teprve po uskladnění určité kinetické energie předá tuto energii do generátoru (ETA Autoquartz).



Obr. 12 Samonatahovací hodinky s mikrogenerátorem [15]

4 VOLBA METOD ŘEŠENÍ

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že existuje celá řada přístupů, kterými lze problematiku využití chůze ke generování elektrické energie pojmout. Ačkoli z hlediska perspektivnosti a integrovatelnosti jednotlivých přístupů se zdá, že generátor založený na piezoelektrickém materiálu je pro danou aplikaci nejvýhodnější volbou, z níže uvedených důvodů bylo rozhodnuto dále se zabývat pouze generátorem, pracujícím na principu *elektromagnetické indukce*. Ze stejných důvodů byla množina elektromagnetických generátorů omezena pouze na *lineární generátory, buzené okolními vibracemi*.

Příčinou tohoto rozhodnutí byla především konstrukce vibrační baterie firmy Brother Industries, inc., uvedená v rešeršní studii. U tohoto výrobku se totiž uváděný výstupní výkon vzhledem k rozměrům zdá být přehnaně vysoký. Proto bylo mezi cíle práce přidáno vypracování energetické rozvahy vibračního generátoru vzhledem k jeho velikosti a hmotnosti. Budou tak ověřeny informace, dostupné v médiích. Část skriptů, vytvořených k tomuto účelu pak poslouží i pro návrh vlastního generátoru, pracujícího na podobném principu, jako zmíněná vibrační baterie.

V důsledku zvoleného řešení je samozřejmé, že generátor, navržený jako finální výstup práce bude pracovat s požadovaným výkonem pouze ve velmi malém rozsahu frekvencí, a v důsledku nízké frekvence lidské chůze bude navíc díky využití lineárního pohybu závaží poměrně rozměrný. Pro vytipování optimálního umístění generátoru bude měřeno zrychlení na různých částech lidského těla, použitelných k uchycení navrhovaného zařízení, a to za pomoci trojosého akcelerometru.

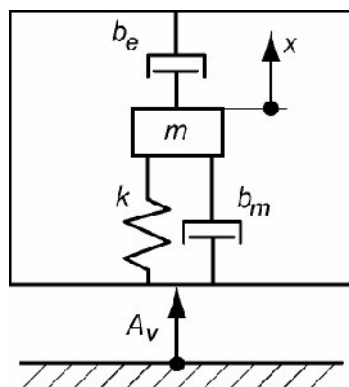
S ohledem na komfort případného uživatele bude limitována hmotnost celého zařízení, což přímo povede k omezení poskytovaného výkonu. Bude tak potřeba najít kompromis mezi schopností napájet soudobá přenosná elektronická zařízení a rozměry a hmotností generátoru. K tomu poslouží sestavení přehledu příkonů některých současných přenosných spotřebičů.

Návrh parametrů bude probíhat za pomoci simulačního modelování v programu MATLAB/Simulink. Konstrukční řešení bude v souladu s požadovanými parametry vytvořeno jako 3D CAD model, což povede i k verifikaci správnosti sestavení části skriptu (díky možnosti ověření hmotnosti navrženého řešení). Parametry cívky budou navrženy jako součást prvotního návrhu, ale finální optimalizaci by bylo vhodné provést po sestavení prototypu, protože některé parametry modelu je velmi obtížné simulovat (jedná se především o mechanické tlumení rezonančního mechanismu).

5 ANALÝZA MOŽNOSTÍ VIBRAČNÍHO GENERÁTORU

5.1 Obecný vibrační generátor

Princip funkce vibračního generátoru spočívá v pohybu rezonančního mechanismu, zapříčiněném budícími vibracemi. Pomocí některého z principů, uvedených v kapitole 3, je pak kinetická energie mechanismu přeměněna na energii elektrickou. Odvození a analýza výkonu takového generátoru již byla několikrát publikována, např. v článcích [6, 21], proto jsou zde zopakovány pouze základní vztahy.



Obr. 13 Schéma vibračního generátoru. Převzato z [6]

Pro zjednodušení se uvažuje lineární model systému s jedním stupněm volnosti. Těleso o hmotnosti m je zavěšeno na pružném členu s tuhostí k . Při buzení vibracemi o zrychlení A_v dochází k relativnímu pohybu, ovlivněnému mechanickým tlumením b_m a elektromagnetickým tlumením b_e . Relativní výchylku pohybu tělesa m označme x . Rovnice takového modelu pak má tvar:

$$m\ddot{x} + (b_e + b_m)\dot{x} + kx = mA_v \quad (1)$$

Po zavedení poměrného útlumu

$$\zeta_0 = \frac{b_e + b_m}{b_k}, \quad (2)$$

kde

$$b_k = 2m\Omega \quad (3)$$

je součinitel kritického tlumení a

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

je vlastní frekvence kmitání, může být rovnice (1) přepsána do tvaru:

$$\ddot{x} + 2\zeta_0\Omega\dot{x} + \Omega^2x = A_v \quad (5)$$

Elektrický výkon je z generátoru odebírán prostřednictvím elektromagnetické tlumící síly (6), závislé na rychlosti soustavy.

$$F = b_e \dot{x} = b_e v \quad (6)$$

Odebíraný efektivní výkon je pak kromě tlumící síly závislý ještě na dalších parametrech, shrnutých v elektromagnetickém tlumení b_e .

$$P = \int_0^v F dv = \frac{1}{2} b_e v^2 \quad (7)$$

Vztah pro výkon je dosažen vyřešením pohybové rovnice (1) a dosazením do rovnice (7). Výsledný vzorec pro výpočet výkonu znázorněného generátoru je pak ve tvaru:

$$P = \frac{m \zeta_e \Omega \omega^2 \eta^3 Z_0^2}{(2 \zeta_0 \eta)^2 + (1 - \eta^2)^2} \quad (8)$$

kde

$$\zeta_e = \frac{b_e}{2m\Omega} \quad (9)$$

je složka poměrného útlumu, způsobená generováním elektrické energie a η je součinitel naladění generátoru:

$$\eta = \frac{\omega}{\Omega} \quad (10)$$

Při buzení vibracemi o frekvenci, shodné s rezonanční frekvencí generátoru se rovnice (8) zjednoduší na tvar:

$$P_{max}^{el} = \frac{m \zeta_e A_v^2}{4 \omega \zeta_0^2} \quad (11)$$

Tento vztah později poslouží i pro ověření správnosti sestavení modelu v MATLABu, u kterého zpočátku předpokládáme budící zrychlení s rezonanční frekvencí.

5.2 Měření zrychlení při chůzi

Měření reálného zrychlení a jeho frekvence při běžné chůzi bylo provedeno za pomoci bezdrátového akcelerometru RD3172MMA7456L: ZSTAR3 firmy Freescale Semiconductor, Inc., schopného měřit zrychlení ve třech osách. Bohužel byla k dispozici pouze demoverze příslušného software, což s sebou přineslo určitá omezení. Nejnepříjemnějším z nich je ořezání zaznamenaného zrychlení v rozsahu $\pm 1,5g$. Při měření zrychlení ve svislé ose je totiž permanentně zaznamenáváno statické gravitační zrychlení 1 g. Kvůli tomuto faktu a obtížnosti pokročilejší kalibrace bylo zaznamenané zrychlení ve svislé ose výrazně asymetrické a muselo být přikročeno k určitému zjednodušení interpretace výsledků. Pro vyhodnocení vhodného umístění navrhovaného generátoru ovšem postačuje i použité zařízení.

5.2.1 Předpoklady

Před samotným zahájením měření byly z teoretických údajů vypočítány předpokládané přibližné hodnoty frekvence výskytu amplitudy zrychlení. Pro odhad bylo využito jednoduché úvahy, předpokládající průměrnou délku kroku figuranta (autora práce) 70 cm při rychlosti chůze 5 km.h^{-1} . Z těchto údajů lze snadno odvodit, že figurant touto rychlostí překoná vzdálenost přibližně 1,4 metrů za sekundu, což odpovídá právě dvěma krokům. Jelikož extrémy zrychlení se dají logicky očekávat právě v okamžiku došlapu, pohybuje se předpokládaná frekvence výskytu těchto amplitud okolo 1 Hz až 2 Hz v závislosti na umístění senzoru. Při připevnění akcelerometru na dolní končetinu totiž bude zaznamenáno hlavně zrychlení při pohybu dané končetiny, tedy pouze každý druhý krok. V případě upevnění akcelerometru na trup figuranta se předpokládá zaznamenání maxima zrychlení při každém kroku, tedy s dvojnásobnou frekvencí oproti předchozímu případu. Pro umístění na horní končetiny platí stejné pravidlo jako pro dolní končetiny, dá se ovšem očekávat menší amplituda zrychlení, protože pohyb rukou při běžné chůzi je přirozeně plynulejší (a tedy s menším maximálním zrychlením) než pohyb nohou.

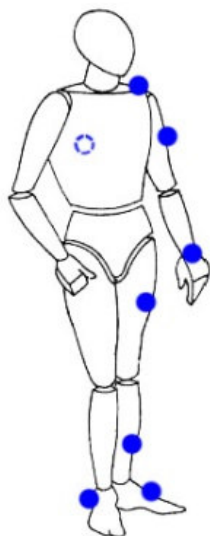


Obr. 14 Akcelerometr ZSTAR3

5.2.2 Metodika měření

Měření spočívalo v opakovaném procházení krátké testovací trasy běžnou rychlostí s akcelerometrem pevně uchyceným k vytipovanému místu na těle, popřípadě zavazadle figuranta. Z důvodu omezení maximálního času měření na 40 sekund bylo každé měření několikrát opakováno a výsledné hodnoty zprůměrovány pro co nejvyšší spolehlivost naměřených údajů. Každé jednotlivé měření bylo provedeno tak, aby styl chůze co nejvíce odpovídal běžné cestovní chůzi figuranta.

Místa, ve kterých bylo měřeno zrychlení, byla zvolena s ohledem na případnou umístitelnost generátoru, popřípadě s očekáváním extrémních hodnot zrychlení. Celkem bylo takto zvoleno 8 různých umístění: pata, nárt, holeň a stehno na noze, zápěstí, paže a rameno na ruce a batoh, který se zdál být velmi vhodným umístěním z hlediska možné hmotnosti a rozměrů generátoru.



Obr. 15 Rozmístění senzorů při měření zrychlení

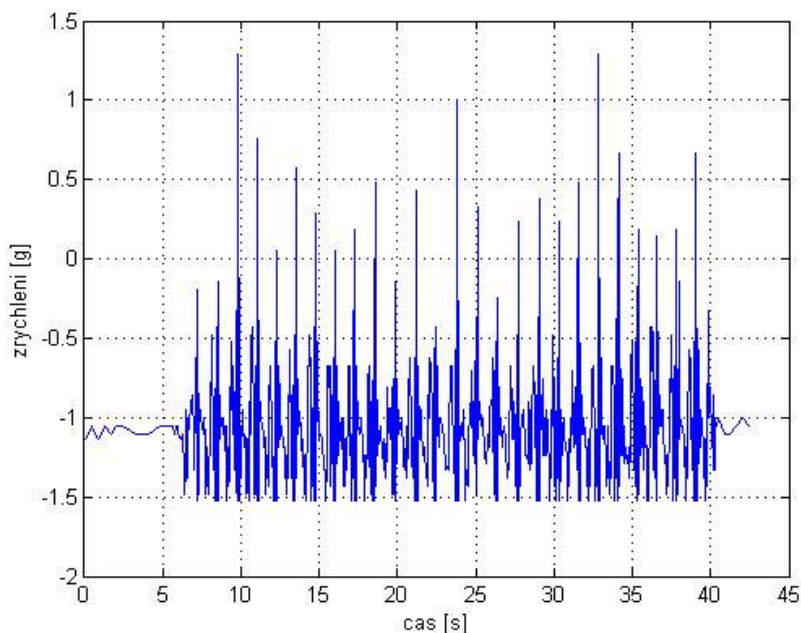
5.2.3 Zpracování a interpretace výsledků

Použitý akcelerometr umožňuje zápis dat do programu MS Excel v podobě času, uplynulého od spuštění měření a hodnot zrychlení ve třech osách v daném čase. Ani přes opakované kalibrace se nepodařilo uspokojivě zprovoznit přepočet surových dat na jednotky g, takže naměřená data byla přepočítána dodatečně pomocí kalibračních měření. Bylo přitom využito zaznamenávání statického gravitačního zrychlení o známé velikosti ($9,81 \text{ m.s}^{-1}$), pomocí kterého bylo možné zjistit přepočet ze surových dat na jednotky g. Přepočítaná data v časové doméně byla využita pro vyhodnocení směru s největším maximálním zrychlením, přičemž se předpokládala shodná velikost amplitudy zrychlení v obou směrech. Dále byly předběžně stanoveny frekvence výskytu amplitudy a její průměrné velikosti v nejvýhodnějším směru pro každou polohu senzoru. Při měření zrychlení na patě však došlo k soustavnému překračování rozsahu přístroje, proto nebylo možné zaznamenat přesné hodnoty.

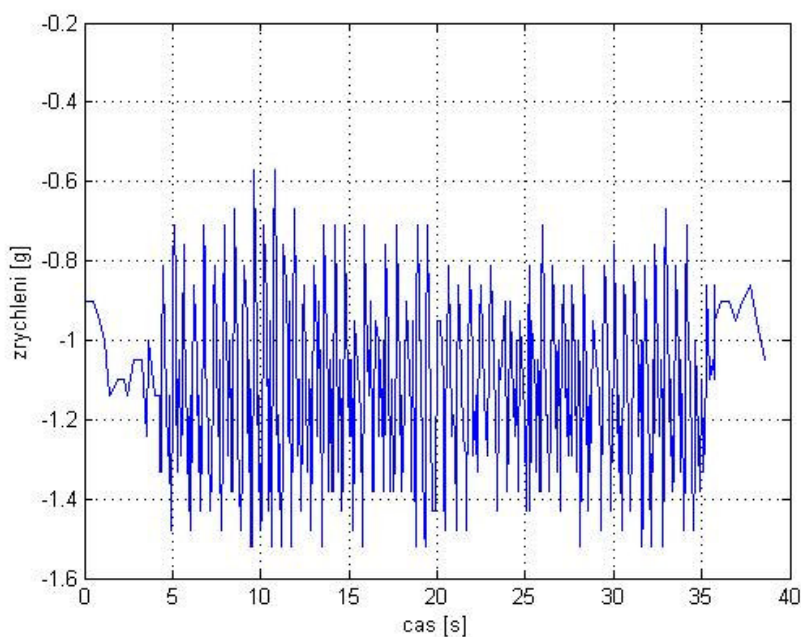
Umístění senzoru	Přibližná frekvence zrychlení [Hz]	Průměrná velikost amplitudy zrychlení [g]	Směr nejvyšší amplitudy vzhledem ke směru chůze	Maximální velikost amplitudy zrychlení [g]
Nárt	0,8	1,6	svisle	2,2
Pata	0,9	>1,5	podélně	?
Holeň	0,9	0,8	svisle	1,8
Stehno	0,9	1,3	svisle	2,4
Batož	1,9	0,3	svisle	0,5
Rameno	1,0	0,4	podélně	0,6
Paže	0,8	0,3	vpřed	0,5
Zápěstí	1,5	0,3	podélně	1,1

Tab. 2 Zprůměrované výsledky měření zrychlení

Dále byla využita rychlá Fourierova transformace (FFT – Fast Fourier Transform) pro převedení dat z časové do frekvenční domény za účelem získání přesnějších hodnot dominantních frekvencí u předběžně nejvýhodnějších umístění. Vzhledem k ořezání amplitudových špiček a ztrátě části dat při přenosu ovšem FFT nemohla sloužit jako spolehlivý ukazatel a proto byly jako velikost amplitudy a dominantní frekvence i nadále uvažovány hodnoty, získané zpracováním dat v časové doméně.



Obr. 16 Data z měření na stehně - časová doména



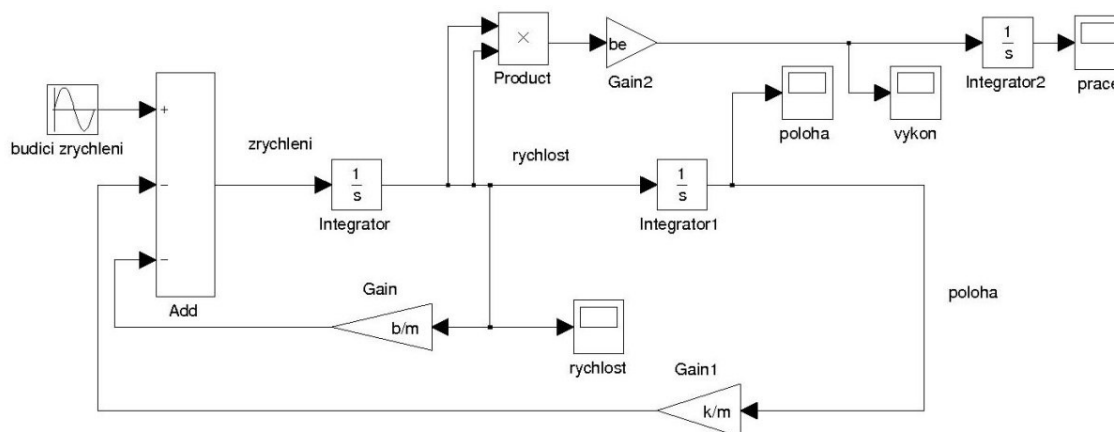
Obr. 17 Data z měření v batohu - časová doména

5.2.4 Vyhodnocení měření

Po uvážení možností upevnění generátoru na jednotlivé měřené pozice a po zvážení prostorových nároků vibračního generátoru bylo rozhodnuto se nadále zabývat umístěním generátoru na stehno, z důvodu velmi vysoké průměrné amplitudy zrychlení, a do batohu, díky prostorovým možnostem, které takové řešení poskytuje. V dalších krocích tedy byly simulovány parametry generátorů, umístěných v těchto pozicích.

5.3 Energetická rozvaha

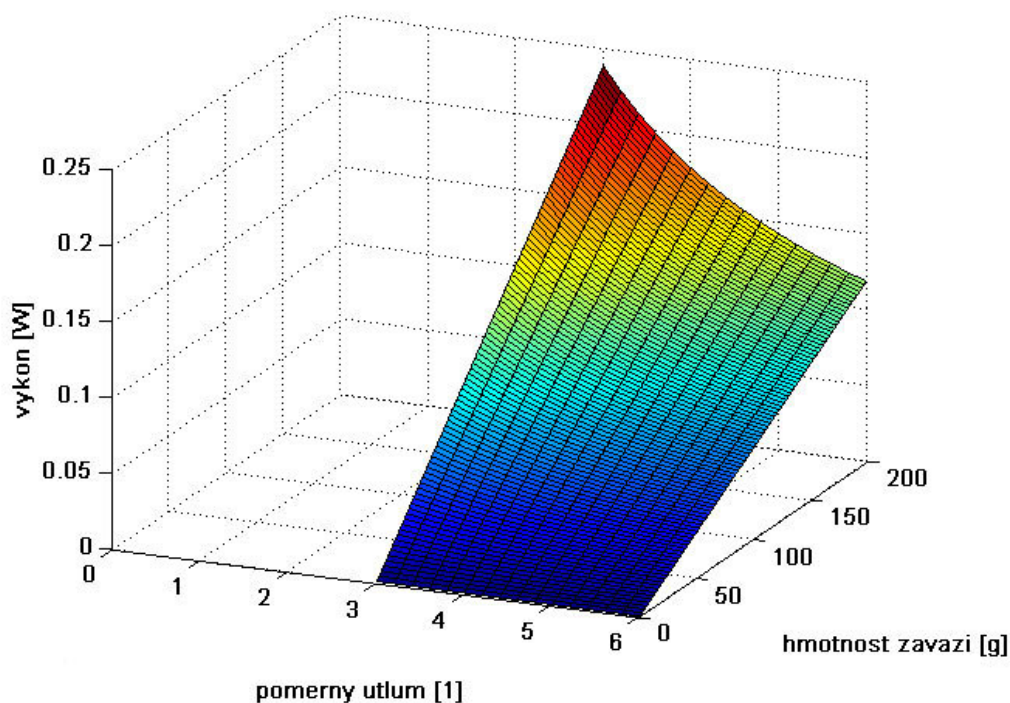
Výše uvedené vztahy umožňují vytvoření modelu soustavy v programu MATLAB/Simulink. K vytvoření modelu byl z důvodu přehlednosti a snadné kontroly zvolen postup znázornění diferenciální rovnice pomocí jednotlivých matematických bloků. Byly vytvořeny dvě verze modelu, přičemž první z nich pracuje s diferenciální rovnicí ve tvaru (1), což postačuje ke kontrole správnosti funkce. Stejně schéma, pouze upravené pro použití maticového počtu, bylo později využito i k ověření vlastností dříve zmiňované vibrační baterie. Pro účely energetické rozvahy a k návrhu vlastního generátoru byla vytvořena přepracovaná verze, která pracuje s diferenciální rovnicí ve tvaru (5), což umožňuje větší názornost výstupních grafů bez nutnosti dodatečných přepočtů v samotném skriptu programu. Pro zjednodušení bylo uvažováno buzení zrychlením se sinusovým průběhem a s frekvencí shodnou s rezonanční frekvencí mechanismu generátoru.



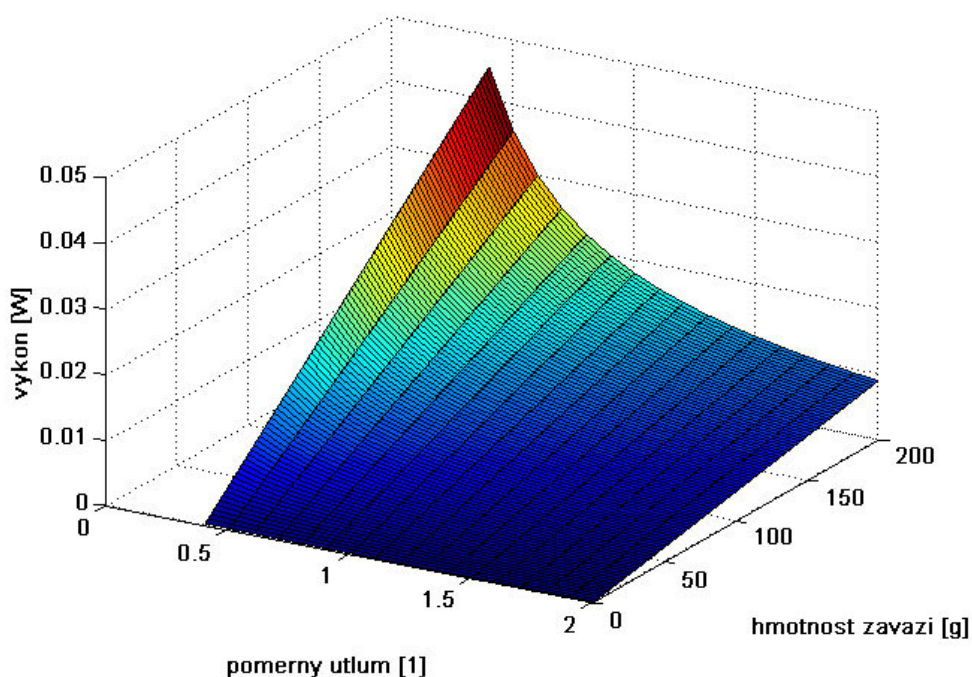
Obr. 18 První verze modelu vibračního generátoru v Simulinku

Účelem energetické rozvahy je najít vhodný kompromis mezi hmotností rezonančního mechanismu generátoru a poskytovaným výkonem, to vše bez překročení maximální povolené amplitudy výchylky a zároveň při zachování principu funkce vibračního generátoru. Proto byl vytvořen skript, který iteruje hmotnosti a poměrné útlumy ve zvolených mezích a s daným krokem, a výkony pro každou kombinaci zapisuje do matice. Zároveň sleduje nejvyšší výchylku rezonančního mechanismu a při překročení nastaveného limitu vyřadí hodnoty z výběru (přepíše je na NaN, čímž zabrání jejich zobrazení v grafu). Výstupem skriptu je 3D graf, znázorňující požadovanou závislost.

Pro účely požadované aplikace byly s ohledem na celkovou velikost zařízení zvoleny maximální povolené výchylky 3, 5 a 7 cm, frekvence a zrychlení byly zadány podle zvolených umístění na stehně a v batohu (viz Tab. 2). Všechny grafy jsou k nalezení na příloženém CD.



Obr. 19 Stehno – Teoretická závislost výkonu na útlumu a hmotnosti



Obr. 20 Batoh - Teoretická závislost výkonu na útlumu a hmotnosti

Z uvedených grafů je zřejmé, že použití vibračního generátoru pro velmi nízké frekvence okolo 1 Hz je při požadavku na „rozumnou“ velikost zařízení v podstatě nemožné, neboť minimální potřebný poměrný útlum pro největší povolenou výchylku 7 cm (tzn. velikost zařízení minimálně 14 cm plus délka samotného pohyblivého členu) podle rovnice (5) dalece přesahuje kritickou hodnotu, takže dochází k silně nadkritickému tlumení a z vibračního generátoru se tak stává generátor, pracující na principu rázů. Naopak při frekvenci, blízké 2 Hz, postačuje pro zachování principu vibračního generátoru i nejpřísnější testované omezení výchylky, tedy 3 cm.

5.4 Spotřeba soudobých přenosných elektronických zařízení

Pro správné stanovení požadavků na vyvíjený generátor je potřeba uvést přehled energetické náročnosti některých zařízení, která by tímto generátorem mohla být napájena. Na základě údajů, obsažených v této kapitole, bude definován požadovaný užitečný výkon, poskytovaný navrhovaným generátorem. Údaje o spotřebě některých zařízení byly již zveřejněny v odborných článcích (např. [21]), přibližný příkon jiných spotřebičů byl spočítán na základě znalosti napětí zdroje, proudového odběru a doby provozu na jedno nabití (např. LED svítidla, mobilní telefon).

Zařízení	Spotřeba
2G mobilní telefon (hovor)	360 mW
GPS přijímač	12-200 mW
LED svítidla	38-80 mW
MP3 čip	46-58 mW
RF přijímač	24 mW
2G mobilní telefon (pohotovostní režim)	9 mW
3D akcelerometr	324 μ W
Hodinky	7 μ W

Tab. 3 Spotřeba některých elektronických zařízení

Je patrné, že moderní zařízení ke svému provozu potřebují poměrně malé množství energie, které, podle výsledků energetické rozvahy, většinou je možno vytvořit pomocí přenosného vibračního generátoru. Díky snaze o minimalizaci spotřeby se přitom dá očekávat, že v blízké budoucnosti bude energetická náročnost elektronických spotřebičů narůstat jen mírně, a to i přes integraci stále výkonnějších a energeticky náročnějších součástí do mobilních zařízení.

5.5 Použitelnost vibračního generátoru pro zadanou aplikaci

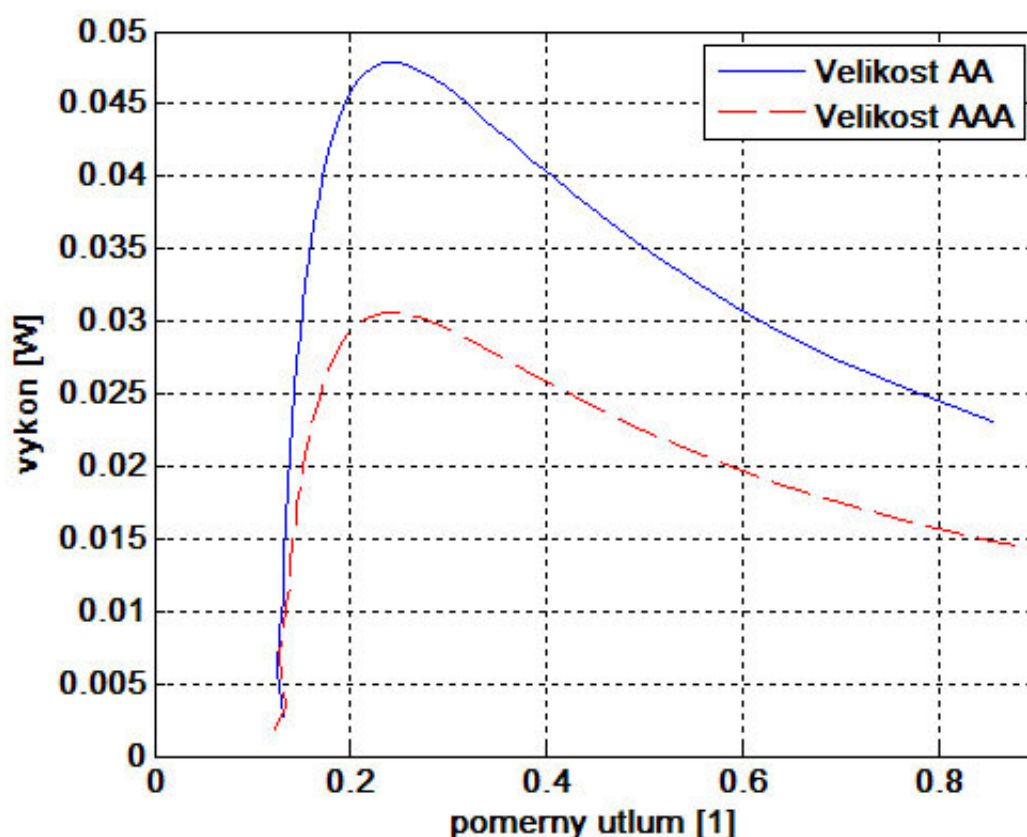
Prostým porovnáním spotřeby jednotlivých elektronických zařízení z kapitoly 5.4 s možnostmi, poskytovanými podle simulací vibračním generátorem, buzeným vibracemi z lidské chůze, lze dojít k závěru, že takový typ generátoru je bezesporu možné použít pro napájení některých zmiňovaných zařízení. Je ovšem třeba vzít v úvahu, že požadované výkony jsou dosahovány při poměrně vysokých hmotnostech rezonančního mechanismu, což se může negativně projevit v komfortu používání generátoru. Na druhou stranu, jelikož princip vibračního generátoru je pro dané podmínky splněn až při frekvencích okolo 2 Hz, je logické, že nejrozmumnější umístění takového generátoru bude v batohu uživatele (viz

Tab. 2), což nepochybně přispěje ke snížení diskomfortu, způsobeného větší hmotností mechanismu. Je také třeba mít na zřeteli, že všechny dosud uvedené simulace počítaly s rovností elektromagnetického a mechanického tlumení, což nemusí odpovídat reálným parametrům. Díky konstrukčním omezením není možné překročit maximální povolenou výchylku, což s sebou nese nutnost dodržet jisté minimální potřebné tlumení. Proto je i v případě velmi malého mechanického tlumení nutno zajistit určité tlumení elektromagnetické, generovaný výkon však potom nebude maximální dosažitelný. Dosažení maximálního možného výkonu by totiž vyžadovalo, aby elektromagnetické tlumení bylo stejně malé, jako mechanické, což by vedlo k malému celkovému útlumu soustavy a tím i k příliš velké výchylce mechanismu. Z předchozí analýzy však v zásadě vyplývá, že má cenu pokračovat v návrhu konkrétního vibračního generátoru pro napájení mobilních aplikací.

5.6 Ověření výkonu vibrační baterie

Jako dodatečný cíl práce, stanovený během rešeršní studie, bylo přidáno ověření výkonu vibrační baterie firmy Brother Industries, inc. (viz strana 16). Pro přibližný výpočet výkonu vibračního generátoru, pracujícího na frekvenci 4-8Hz byl vytvořen skript, který po zadání vstupních parametrů (rozměry zařízení, rezonanční frekvence, budící zrychlení, materiál rezonančního mechanismu atd.) iteruje hmotnosti v závislosti na velikosti rezonančního mechanismu a pro každou hmotnost stanoví maximální dosažitelný elektrický výkon, při kterém nedojde k překročení maximální možné výchylky. Maximální povolená výchylka se přitom dopočítává automaticky ze znalosti velikosti celého zařízení a aktuální uvažované velikosti rezonančního mechanismu. Z maximálních výkonů pro jednotlivé hmotnosti je pak vybrán nejvyšší dosažitelný výkon generátoru a zobrazeny parametry, při kterých ho bylo dosaženo. Výstupní data jsou zobrazena do grafů, které zobrazují závislost maximálního dosažitelného výkonu na poměrném útlumu soustavy.

Během samotného ověření bylo přistoupeno k několika zjednodušujícím krokům. Prvním, a nejpodstatnějším z nich bylo započítání wolframu jako materiálu rezonančního mechanismu. Bylo tak provedeno z důvodu velké hustoty, a tedy hmotnosti daného prvku, což zaručuje, že vypočtený výkon bude opravdu nejvyšší teoreticky dosažitelný. Při tom ovšem nejsou vzaty v potaz nevalné magnetické vlastnosti wolframu, který by rozhodně nemohl sloužit jako součást magnetického obvodu. Magnetický obvod by tedy ve skutečnosti musel zabírat místo na úkor wolframové zátěže, což by vedlo ke snížení vypočítaného výkonu. Dále byla stanovena uvažovaná rezonanční frekvence tohoto generátoru na 8 Hz. Média [25] totiž uvádí rozsah frekvencí mezi 4-8 Hz, ovšem dá se pochybovat o přeladitelnosti mechanismu tohoto generátoru, proto byla jako rezonanční frekvence mechanismu stanovena horní uváděná mez. Jako poslední zjednodušení bylo zvoleno zanedbatelně malé mechanické tlumení.



Obr. 21 Závislost efektivního výkonu vibrační baterie na poměrném útlumu

Z výstupů simulace je zjevné, že ani přes značné zjednodušení parametrů ve prospěch většího vypočteného efektivního výkonu není fyzikálně možné dosáhnout výkonů, uváděných pro tyto generátory (až 180 mW pro velikost AA). Dokonce i v daném případě, kdy je mechanické tlumení nulové, respektive zanedbatelně malé, a tedy veškerý poměrný útlum byl způsoben elektromagnetickým tlumením, podílejícím se na generování výkonu, není možné přesáhnout výkon cca 50 mW pro vibrační baterii velikosti AA, respektive 31 mW pro velikost AAA. Je tedy možné, že údaj o vysokém výkonu vznikl jako reklamní trik, popřípadě chybou při psaní článku, pojednávajícího o tomto generátoru, neboť výkon 18 mW (tedy desetinový oproti uváděným informacím) se zdá být dosažitelný i při uvažování regulérní konstrukce magnetického obvodu a rezonančního mechanismu.

6 NÁVRH VIBRAČNÍHO GENERÁTORU

6.1 Požadavky na přenosný vibrační generátor

Před započítím samotného procesu návrhu generátoru je třeba přesně definovat požadavky, kladené na generátor jak z hlediska konstrukčního, tak funkčního. Z vlastního měření a energetické rozvahy vyplývá jako nejvhodnější umístění generátoru na batoh (popř. do batohu) uživatele. Od toho se odvíjí omezení maximální velikosti a hmotnosti zařízení. Dále je třeba, aby byl navržený přístroj schopný napájet moderní spotřební elektroniku (potřebné příkony viz. kapitola 5.4), čímž je definován požadavek na minimální užitečný výkon generátoru. Základní požadované hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce:

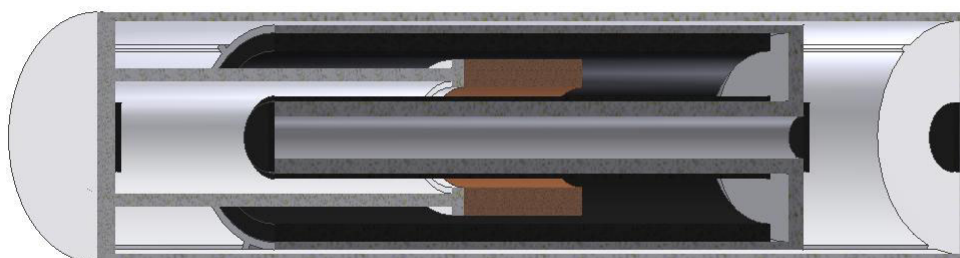
Maximální rozměry (v x š x h)	220 x 40 x 40 mm
Maximální hmotnost	250 g
Minimální užitečný výkon	50 mW

Tab. 4 Požadavky na vyvíjený generátor

Při předběžném návrhu je také potřeba počítat s faktem, že samotný mechanismus nebude tvořit 100% váhy, ani výsledných rozměrů generátoru, a také s tím, že část generovaného výkonu se bez užítu disipuje na odporu cívky generátoru. Proto je vhodné ponechat jisté rezervy, aby výsledný návrh opravdu splňoval požadavky, na něj kladené.

6.2 Základní koncepce

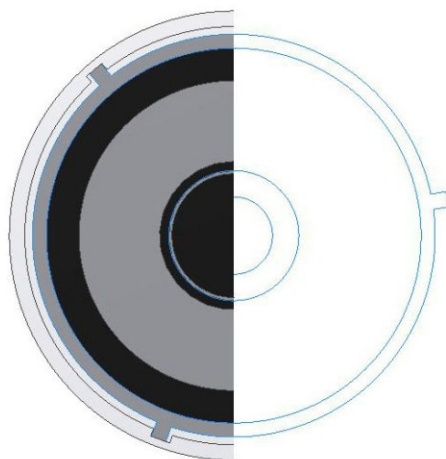
Navrhovaný generátor pracuje na principu lineárního recipročního pohybu rezonančního mechanismu s magnetickým obvodem, při kterém dochází k časové změně magnetického toku skrz cívku, což vede ke generování elektrické energie. Cívka je uchycena nepohyblivě k základně generátoru. Předpokládá se tvar dutého tubusu, v jehož ose se bude pohybovat samotný rezonanční mechanismus. Materiál rezonančního mechanismu je dán požadavkem na magnetickou vodivost, naopak vnější plášť musí být jednak nemagnetický a jednak poměrně lehký, takže nejvhodnějším kandidátem bude některý druh plastu. Generátor bude naladěn na rezonanční frekvenci 1,9 Hz, přičemž požadovaná tuhost bude zajištěna pomocí dvou párů vzájemně se odpuzujících magnetů.



Obr. 22 Řez mechanismem navrhovaného generátoru

6.3 Mechanické vedení

Aby se předešlo zbytečně velkým ztrátám energie kvůli tření, je rezonanční mechanismus vybaven vodícími lištami, které zapadají do drážek ve vnějším plášti generátoru a zajišťují jak podélné, tak příčné vedení mechanismu. Na povrch kontaktních ploch se předpokládá nanesení teflonové vrstvy pro snížení koeficientu tření.



Obr. 23 Rozmístění lišt mechanického vedení

6.4 Zahrnutí vlivu třecí síly na odezvu soustavy

V dosavadních odhadech bylo počítáno s viskózním mechanickým tlumením, způsobujícím disipaci části mechanické energie rezonančního mechanismu. Pro zjednodušení bylo předpokládáno, že velikost tohoto mechanického tlumení bude stejně velká, jako velikost tlumení elektromagnetického, a tedy že se budou obě tlumení podílet stejným dílem na celkovém útlumu soustavy. Reálná soustava se ale bude chovat odlišně. Z důvodu zvýšení přesnosti simulace tedy bylo viskózní tlumení nahrazeno třecí silou F_t , nezávislou na aktuální rychlosti pohybu rezonančního mechanismu. Tato síla byla vypočítána pomocí údajů o zrychlení ve třech osách, získaných při měřeních v kapitole 5.2. Pro urychlení samotného mechanismu je využito největší naměřené hodnoty zrychlení v jedné ose, kdežto zrychlení ve zbylých dvou osách mají příčný směr vzhledem k pohybu mechanismu. Způsobují tedy normálovou sílu F_N . Při znalosti materiálu povrchu mechanického vedení generátoru tak je možno vypočítat třecí sílu v každém okamžiku pohybu. Tato třecí síla bude působit vždy proti směru pohybu mechanismu a její velikost bude

$$F_t = F_N \cdot f, \quad (12)$$

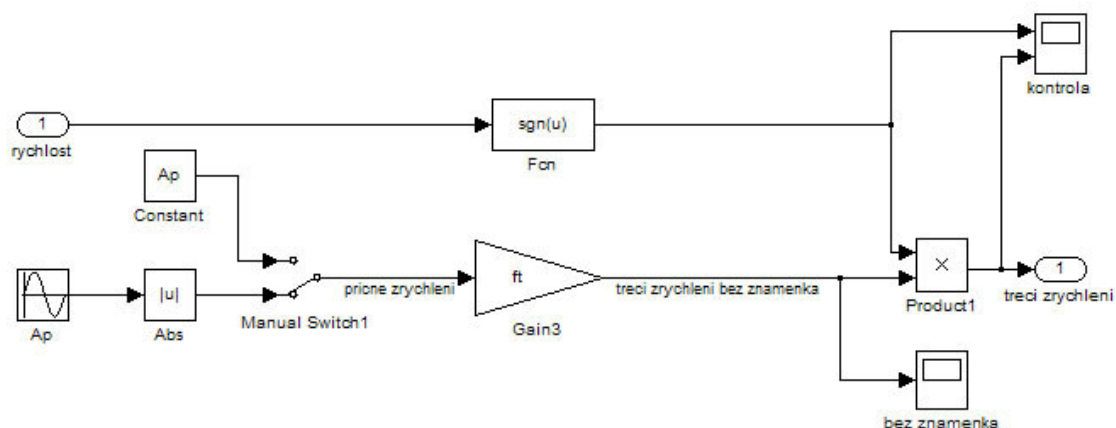
kde f je součinitel tření a normálová síla

$$F_N = m \cdot a_p \quad (13)$$

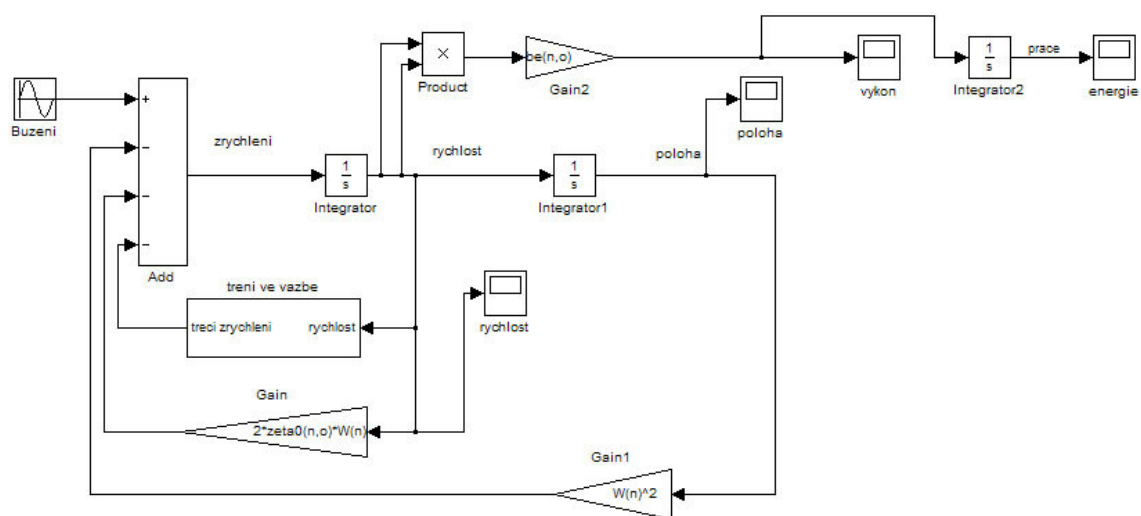
je závislá na velikosti příčného zrychlení a_p a hmotnosti m rezonančního mechanismu generátoru. Pro další simulace tak byl vytvořen nový model, zahrnující vliv třecí síly, a tedy využívající upravené pohybové rovnice (1):

$$m\ddot{x} + b_e\dot{x} + \text{sgn}(\dot{x}) \cdot F_t + kx = mA_v \quad (14)$$

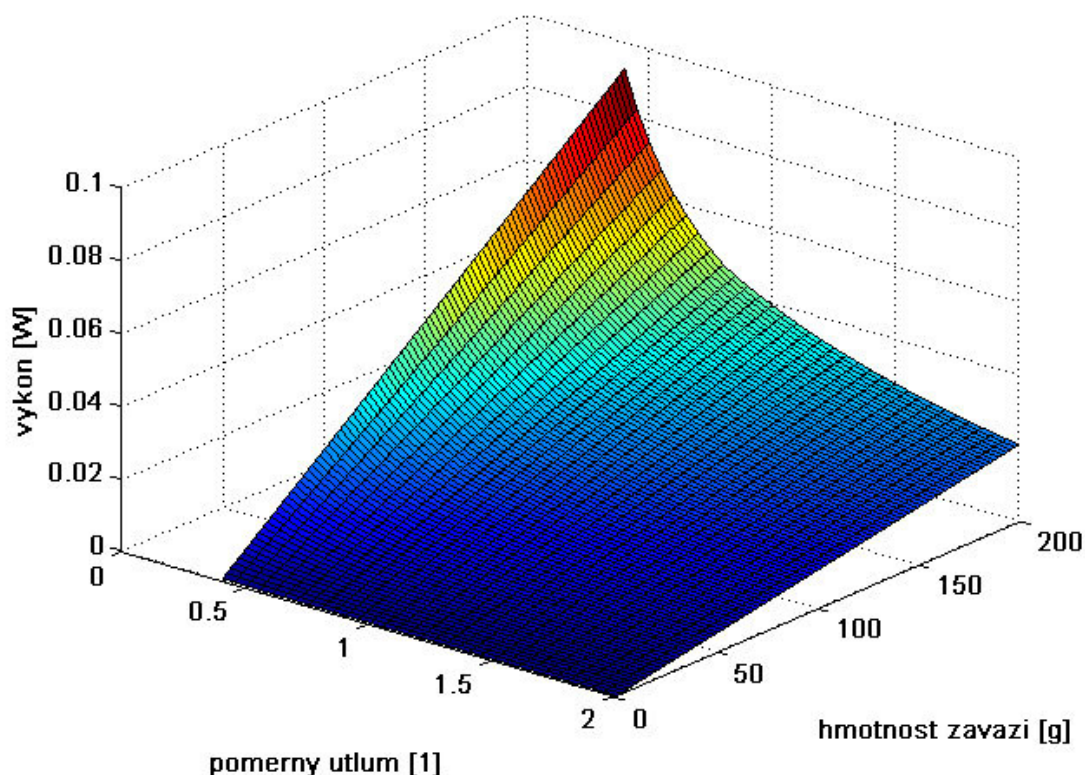
S využitím nového modelu byla odsimulována oprava původní energetické rozvahy, poskytující příznivější výsledky co se týče teoreticky dosažitelných výkonů. Důvodem k tomu je velmi malá velikost třecí síly v mechanickém vedení generátoru, takže v podstatě veškerý útlum soustavy je realizován pomocí cívky a připojené zátěže (tedy elektromagneticky), což umožňuje dosáhnout většího generovaného výkonu. Na druhou stranu jsou tak kladeny větší nároky na cívku, což by mohlo vést k jistým problémům s její konstrukcí.



Obr. 24 Implementace třecí síly do modelu v simulinku



Obr. 25 Model s implementovaným třením



Obr. 26 Opravená energetická rozvaha s maximální výchylkou 3 cm

6.5 Konstrukce rezonančního mechanismu a cívky

Pro požadovaný výkon generátoru je při konstrukci rezonančního mechanismu třeba splnit dvě podmínky: správná velikost hmotnosti mechanismu a zároveň elektromagnetického tlumení.

Hmotnost rezonančního mechanismu je dána jeho konstrukčním řešením. Protože byly dostupné magnety tvaru kruhových segmentů se směrem magnetování do středu kruhu, bylo zvoleno řešení, které takové magnety využívá (obr. 20). Toto řešení navíc umožňuje použít jedinou samonosnou válcovou cívku, což může být výhoda z hlediska jednoduchosti její výroby.

Délka mechanismu vyplývá z maximální povolené výchylky mechanismu a ze způsobu zamýšleného umístění a velikosti cívky, která by se v žádném okamžiku funkčního cyklu generátoru neměla ani částečně dostat mimo vnější obrys rezonančního mechanismu. Tím je zajištěn konstantní počet funkčních závitů cívky. Uzavření magnetického obvodu je zajištěno propojením pólových nástavců dnem mechanismu.



Obr. 27 Řez rezonančním mechanismem prvního návrhu

Velikost elektromagnetického tlumení je ovlivněna jak konstrukcí cívky, tak impedancí připojené zátěže (spotřebiče) a způsobem, jakým je cívka umístěna v časově proměnném magnetickém poli. Odvození velikosti elektromagnetického tlumení se provede pomocí rovnic pro okamžitý výkon a napětí, indukovaného na cívce generátoru. Okamžitý výkon generátoru je možno získat úpravou rovnice (7):

$$p = b_e \cdot \dot{x}^2 \quad (15)$$

Dále je ovšem známo, že disipativní výkon je roven podílu druhé mocniny indukovaného napětí a impedance elektrického obvodu, tedy:

$$p = \frac{u_i^2}{\sqrt{(R+R_C)^2 + (j\omega L)^2}} \quad (16)$$

při použití cívky bez jádra je možno indukčnost L zanedbat, čímž v obvodu zůstane pouze ohmický odpor a vztah se zjednoduší na tvar:

$$p = \frac{u_i^2}{R+R_C} \quad (17)$$

kde R_C je odpor cívky. Indukované napětí na cívce je dáno jako křivkový integrál vektorového součinu rychlosti pohybu vodiče \vec{v} a magnetické indukce \vec{B} :

$$u_i = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{r} \quad (11)$$

Pokud je l aktivní délka závitů cívky, N počet aktivních závitů a B_x velikost magnetické indukce, kolmé na směr rychlosti, můžeme vyjádřit indukované napětí jako:

$$u_i = l \cdot B_x \cdot N \cdot \dot{x} \quad (18)$$

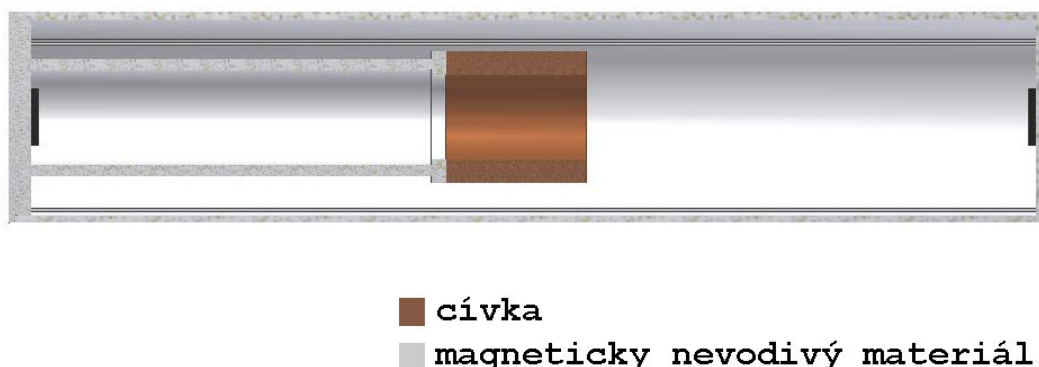
Tento vztah je možno dosadit do rovnice (17). Porovnáním rovnic (15) a (17) a úpravou této rovnosti disipativního a odebíraného výkonu (logicky musí být stejné) dostáváme vztah pro výpočet velikosti elektromagnetického tlumení:

$$b_e = \frac{(B_x \cdot N \cdot l)^2}{R + R_C} \quad (19)$$

Velikost odporu cívky R_C je přitom dána jejím průřezem S , měrným elektrickým odporem ρ a celkovou délkou vodiče cívky $l \cdot N$:

$$R_C = l \cdot N \cdot \frac{\rho}{S} \quad (20)$$

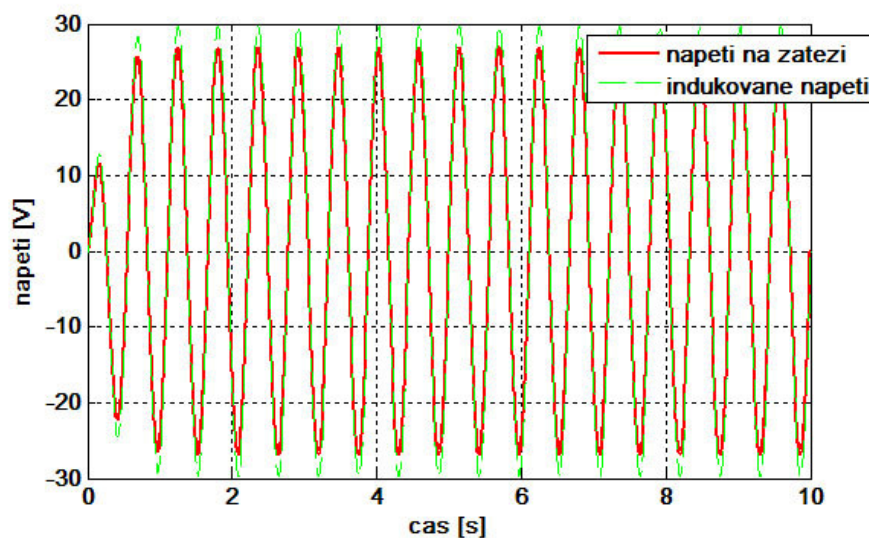
Z rovnice (19) vyplývá, že pokud má generátor fungovat přesně podle požadavků, je třeba už při jeho návrhu znát elektrický odpor připojované zátěže. Použití odporu jiné hodnoty, popřípadě navinutí nesprávné cívky, povede k nedodržení hodnoty elektromagnetického tlumení a generátor bude buď generovat méně energie, anebo v opačném případě dojde k překročení mezní povolené výchylky rezonančního mechanismu. Pro účely simulací byl odpor zátěže stanoven na 1000Ω a 5000Ω . Je také zřejmé, že odpor zátěže v poměru k odporu cívky by měl být co největší, protože cívka se zátěží tvoří v podstatě odporový dělič, a snahou je získat co největší napětí na zátěži (tedy co nejmenší úbytek napětí na cívce).



Obr. 28 Řez pláštěm generátoru s patrným umístěním cívky

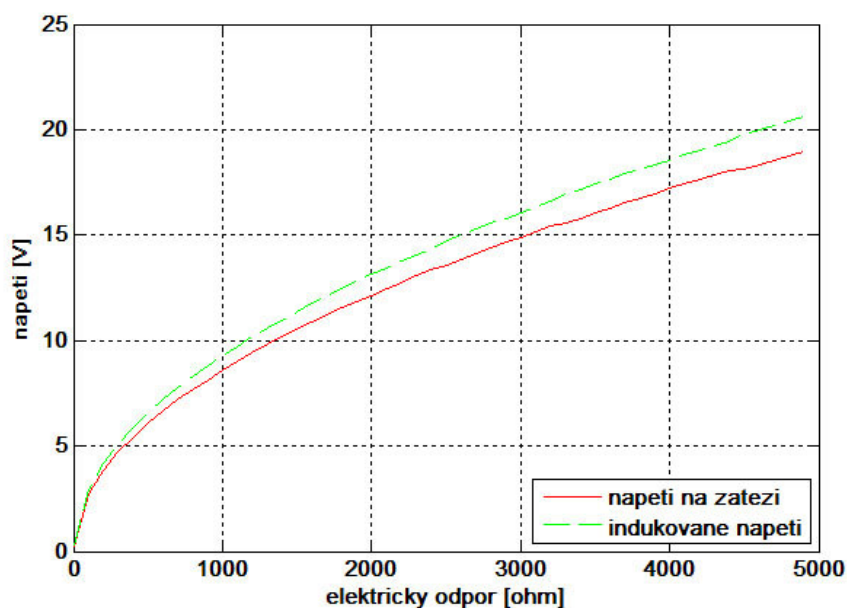
Pro samotný proces návrhu velikosti byly připraveny dva skripty v jazyce MATLAB. První z nich je v podstatě shodný se skriptem pro energetickou rozvahu, pouze je v něm viskózní mechanické tlumení nahrazeno třecí funkcí. Tento skript slouží ke zvolení pracovního výkonu a hmotnosti mechanismu při omezené maximální výchylce mechanismu. Během volby výkonu je však třeba počítat s rezervou kvůli ztrátám na cívce. Druhý skript při zadání požadované hmotnosti, výkonu, poloměrů jednotlivých magnetů a pólových nástavců (navrhuje se válcový mechanismus), a některých dalších potřebných parametrů (např. odpor zátěže, výška cívky a její koeficient plnění...) vypočítá výšku pólových nástavců a tloušťku dna mechanismu tak, aby byla splněna podmínka hmotnosti. Při známé velikosti magnetické indukce ve vzduchové mezeře je také skript schopen vypočítat potřebné parametry cívky (průměr drátu, počet závitů ve vrstvě a počet vrstev

nad sebou) a ověřit, zda se navržená cívka vejde do vymezeného prostoru. Dále je pomocí tohoto skriptu simulován průběh celkového indukovaného napětí, a užitečného napětí na zátěži. Byly testovány i maximální hodnoty napětí, jakých je možno dosáhnout pro odpory zátěže $0\ \Omega$ až $5000\ \Omega$ (při konstantním výkonu generátoru – cívka, optimalizovaná podle požadavků na přesnou hodnotu tlumení pro každou zátěž zvlášť).



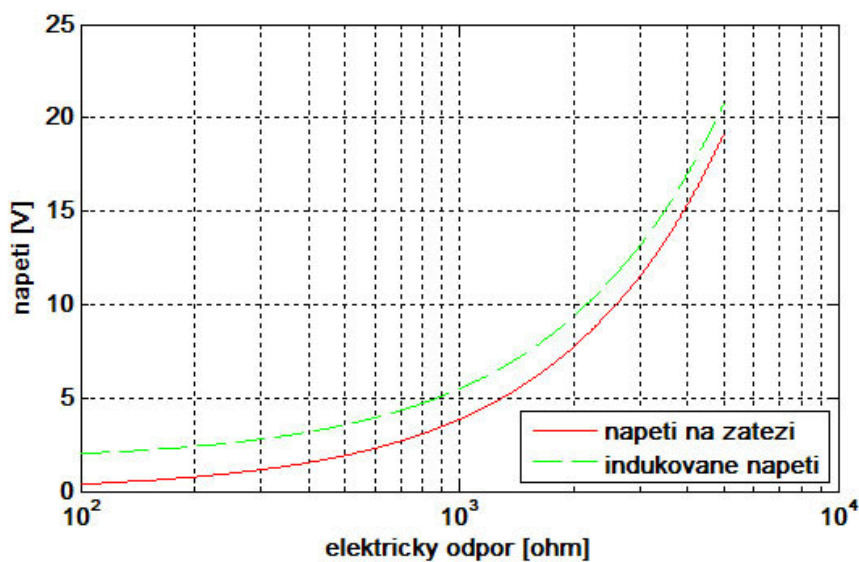
Obr. 29 Předpokládaný průběh indukovaného napětí a napětí na zátěži v čase

Ze závislosti průběhu napětí na čase je zřejmé, že na správně navržené cívce není úbytek napětí nikterak kritický. Použití zátěže $5\ \text{k}\Omega$ a pro tuto zátěž navržené cívky zajistilo maximální generované napětí až 27 V. Při snižování odporu zátěže a opětovné optimalizaci cívky se ovšem snižuje i hodnota indukovaného napětí.

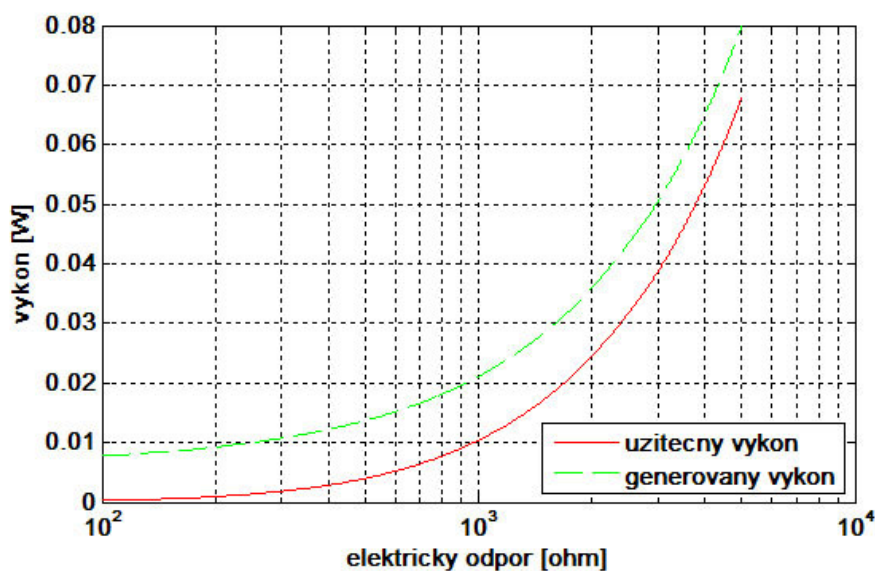


Obr. 30 Závislost maximálního dosažitelného efektivního napětí na odporu zátěže

V následující simulaci byla ponechána cívka konstantní, optimalizovaná pro zátěž $5\text{ k}\Omega$, a testováno indukované napětí a výkon pro různé připojené odpory. Zapojení větší ohmické zátěže, než na kterou je cívka navržena, by znamenalo nedodržení hodnoty tlumení, a při dané konstrukci by to mohlo vést až k poškození generátoru. Proto jsou v simulaci uvažovány pouze odpory menší, než pro které je optimalizována cívka. Lze očekávat, že při snižující se zátěži, a tedy s rostoucím tlumením dle rovnice (19), bude klesat rozkmit soustavy, a s ním i rychlost a generovaný výkon. Tento fakt je zřejmý z následujících grafů:



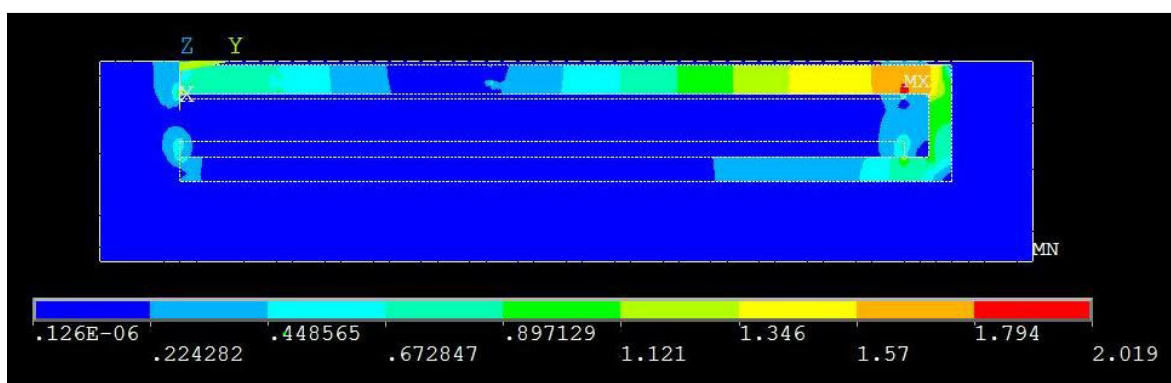
Obr. 31 Závislost napětí na zátěži při použití stejné cívky



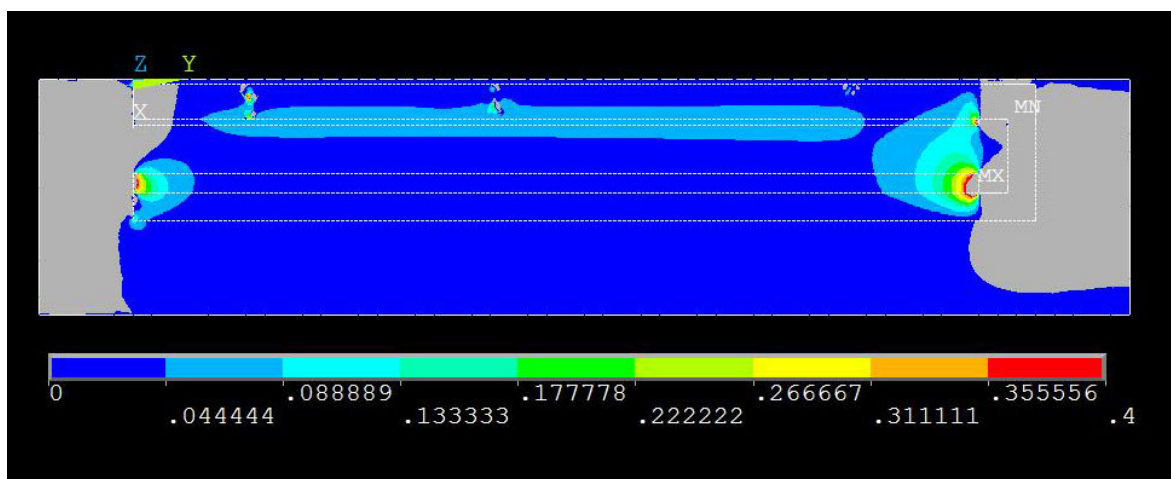
Obr. 32 Závislost výkonu na zátěži při použití stejné cívky

Tyto simulace dokazují, že je vhodné, jak již ostatně bylo zmíněno, znát hodnotu elektrického odporu plánované zátěže už při samotném návrhu cívky, a tuto cívku optimalizovat pro maximální výkon.

Dalším krokem návrhového algoritmu je zjistit přesnou velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře. V dosavadních simulacích se předpokládala hodnota přibližně 0,4 T, ovšem vzhledem k navržené geometrii mechanismu vyvstala otázka, jestli výsledná magnetická indukce bude opravdu dosahovat takové velikosti. Hodnotu velikosti magnetické indukce je možno vypočítat analyticky [10], ale vzhledem k nutnosti kontroly nasycení pólových nástavců bylo od tohoto výpočtu upuštěno a místo toho byla provedena simulace v programu ANSYS. Ta ovšem prokázala, že při použití rozměrů rezonančního mechanismu, vypočítaných pomocí výše zmiňovaného skriptu, dojde v důsledku malého průřezu pólových nástavců k jejich přesycení, a výsledná hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře (tedy v prostoru cívky) je tak mnohem menší, než bylo očekáváno. Původní návrh počítal s hodnotou okolo 0,3 až 0,4 T, bohužel simulace ukázaly, že reálné jsou hodnoty o řád nižší (přibližně 0,03 T).



Obr. 33 Přesycení pólových nástavců

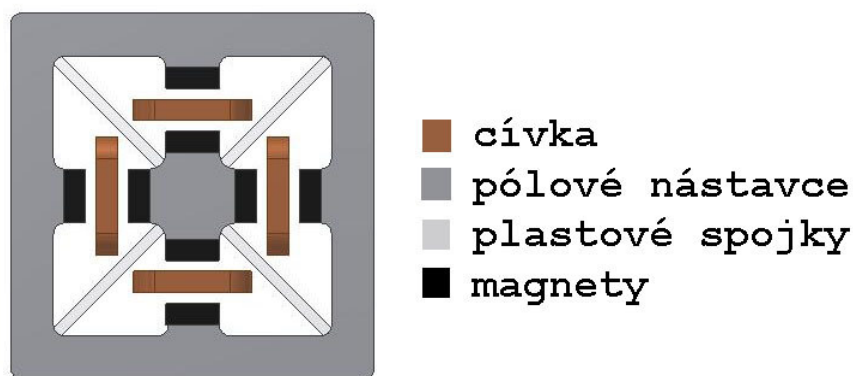


Obr. 34 Kolmá složka magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Při zpětném dosazení takto získané magnetické indukce do návrhového skriptu vyjde najevo, že není možné navrhnout cívku, která by zajišťovala dostatečné elektromagnetické tlumení a zároveň se vešla do vymezeného prostoru. Pro odstranění tohoto problému bylo vyvinuto úsilí optimalizovat průřez pólových nástavců, avšak výsledkem bylo pouze potvrzení nevhodnosti použití této konstrukce pro nízkofrekvenční aplikace. Aby byla zajištěna funkčnost takto zkonstruovaného generátoru, musela by být buď překročena podmínka maximální hmotnosti, anebo by naopak musel být snížen požadavek na poskytovaný výkon. Ani jedna varianta však není žádoucí, a proto musí být změněn způsob uzavření magnetického obvodu, a tedy změněna koncepce celého generátoru.

6.6 Jiné konstrukce magnetického obvodu

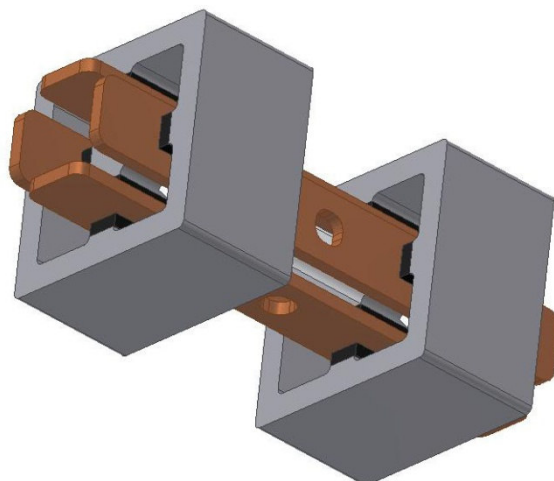
Předchozí návrh ukázal, že snaha uzavřít magnetický obvod přes dno se pro nízkofrekvenční aplikace při zachování akceptovatelné hmotnosti mechanismu nehodí. Proto byl pomocí 3D modelování vytvořen návrh mechanismu, využívající uzavření



Obr. 35 Přepracovaná koncepce rozmístění pólových nástavců

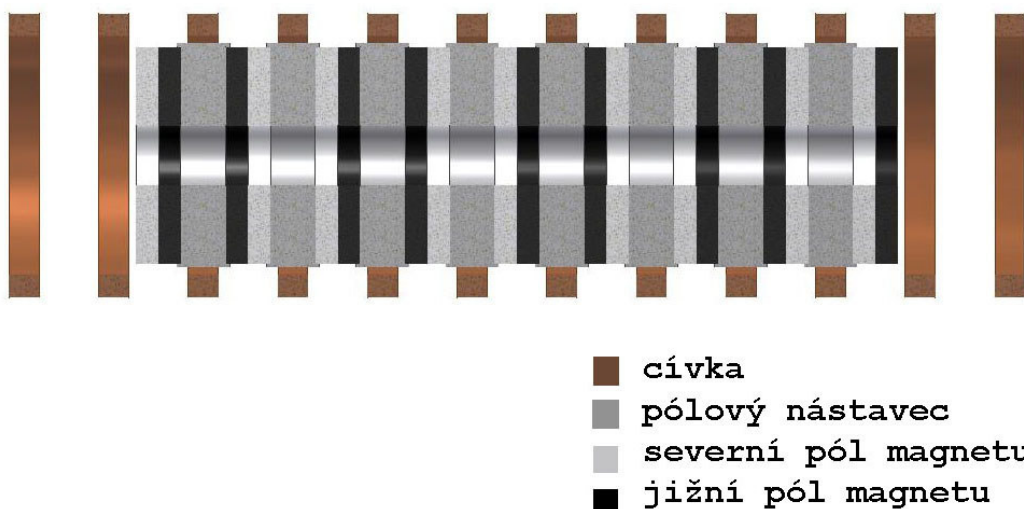
magnetického obvodu v horizontálním směru. Tento model slouží k ověření hmotnosti mechanismu a možnosti umístění cívky do prostoru vzduchové mezery (obr. 27).

I v tomto případě se však ukázalo, že stanovené počáteční požadavky jsou příliš vysoké. Pokud má tato koncepce splňovat hmotnostní limit, bude nutné, aby cívka přesahovala obrysy mechanismu, což při snaze o zachování správné hodnoty elektromagnetického tlumení, a tedy správného počtu aktivních závitů dále povede k obrovskému celkovému odporu cívky R_C , a zbytečně velkému ztrátovému výkonu. Navíc by konstrukce cívky musela být tvarově poměrně složitá, aby bylo možné ji vměstnat do vymezeného prostoru. Ani tato konstrukce se tedy nezdá být příliš vhodná pro zadanou aplikaci. Možným řešením by bylo větší omezení výchylky mechanismu. To by sice vedlo ke snížení maximálního možného výkonu, ale na druhou stranu by to umožnilo použít menší cívku s menším odporem. Nevýhoda tvarové složitosti ovšem zůstává.



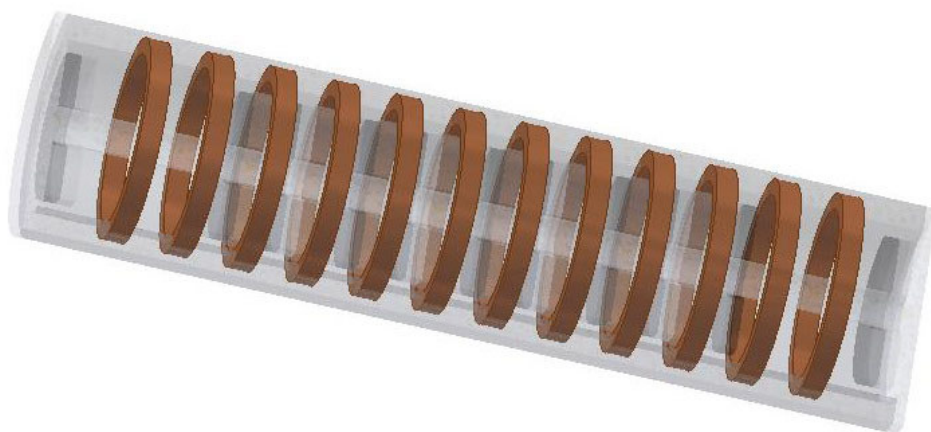
Obr. 36 3D pohled na přepracovanou koncepci – zřetelné zmenšení průřezu cívky

Další možný způsob konstrukce magnetického obvodu spočívá v navrstvení válcových nebo prstencových magnetů a železných pólových nástavců střídavě na sebe tak, aby vždy souhlasné póly magnetů směřovaly proti sobě.



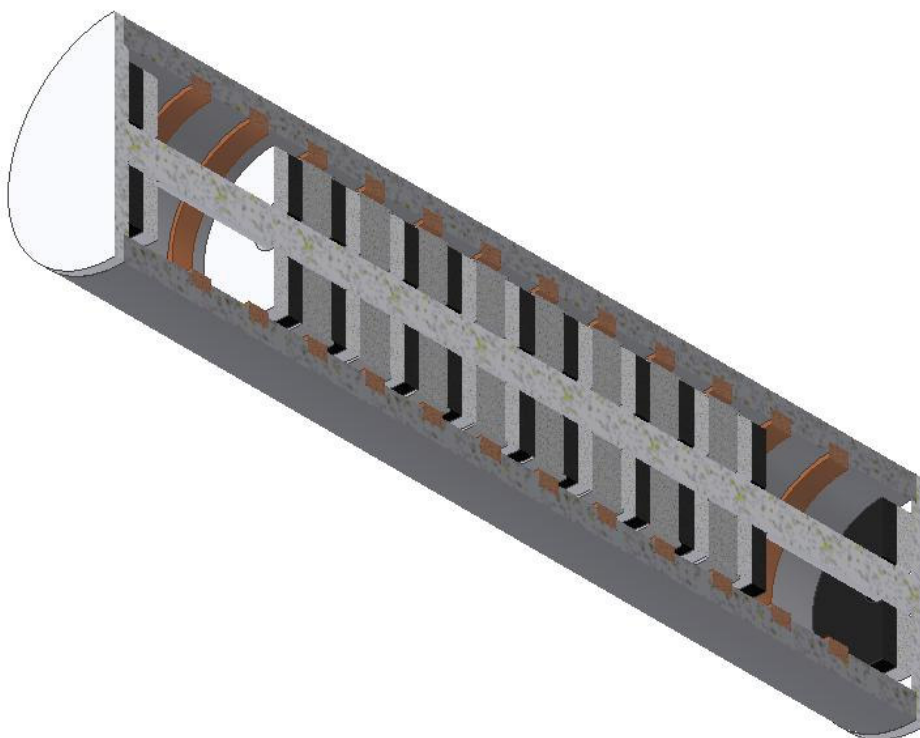
Obr. 37 Uspořádání finálního koncepčního návrhu

Toto uspořádání má výhodu v tom, že rotor, tedy pohyblivá část generátoru nemusí být nijak složitě tvarována, protože cívka je umístěna zcela mimo ni. Magnetický obvod se uzavírá v jednotlivých vrstvách přes stěny generátoru, které v tomto případě ovšem musí být magneticky vodivé. Cívku lze vyřešit několika způsoby, například u návrhu lineárního generátoru pro generování energie z vln [2][3] je použita třífázová válcová cívka s přesně danou roztečí vrstev. Pro zadanou aplikaci generování energie z chůze se ovšem zdá být výhodnější a výrazně jednodušší využít soustavy plochých cívek, opět se vzájemnou roztečí danou vzdáleností středů pólových nástavců pro optimální výkon.



Obr. 38 Rozmístění plochých cívek v plášti

Použití oddělených cívek je nezbytné, protože směr magnetické indukce v sousedních pólových nástavcích je opačný, takže při použití jedné cívky by došlo ke vzájemnému vyrušení indukovaného napětí. Tento způsob konstrukce se ze všech uvažovaných možností zdá být v podstatě jediný opravdu využitelný, neboť by neměly hrozit komplikace s přesycením pólových nástavců ani s nedostatečným prostorem pro umístění cívky jako v předchozích případech.



Obr. 39 Řez finálním návrhem generátoru

7 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A NÁMĚTY NA DALŠÍ VÝZKUM

Z provedených simulací a výpočtů plyne, že má smysl se i nadále zabývat vývojem generátoru pro generování elektrické energie z lidské chůze. Kvůli problémům s magnetickým obvodem a nepřiměřenou hmotností mechanismu musely být zavrženy dvě nadějně konstrukce, které by v jiných aplikacích mohly najít uplatnění. Jejich návrhové skripty jsou zcela univerzální, a po zadání správných parametrů budou fungovat i při případném návrhu lineárního generátoru pro vyšší pracovní frekvence. Pro účely zadané aplikace se jeví vhodné využití buď poslední zmíněné konstrukce, anebo řešení, z této konstrukce vycházejícího.

Hodnoty zrychlení, naměřené na jednotlivých částech těla při chůzi mohou být dále využity při optimalizaci nastíněné konstrukce, nebo i při návrhu generátoru, pracujícího na jiném principu. Navíc je možné naměřené hodnoty porovnat s údaji již zveřejněnými a na základě znalostí konstrukčních problémů, kterým bylo nutno čelit v této práci, je možné kriticky zhodnotit závěry, kterých bylo dosaženo v rámci tématicky podobných článků, např. [21].

Na tuto práci je možné navázat jak dokončením vývoje navrhovaného generátoru a výrobou a ověřením prototypu, tak třeba navržením elektroniky generátoru. Bylo by také zajímavé pokusit se navrhnout generátor, využívající místo rezonance pouze energii jednotlivých rázů při chůzi (nadkriticky tlumený mechanismus). Ten by totiž bylo možné umístit na místa s libovolně nízkou frekvencí budícího zrychlení (viz. kapitola 5.3).

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámit se s problematikou generování elektrické energie v nízkofrekvenčních aplikacích a položit základ pro vývoj generátoru, využitelného pro generování elektrické energie z lidské chůze. Práce obsahuje stručný přehled v současnosti zkoumaných přístupů k danému problému, které demonstrují nespočet variant, jakými se dá tato problematika pojmout. V další části bylo provedeno měření zrychlení při chůzi na různých částech těla, ze kterého vyplynulo optimální umístění generátoru vzhledem k hmotnostním, rozměrovým a výkonovým omezením. Na základě vypracování teoretické energetické rozvahy a krátké rešerše spotřeby moderních osobních elektronických zařízení pak byly stanoveny přiměřené požadavky na vyvíjený generátor. Vytvořených skriptů bylo ještě před samotným započítáním návrhového procesu využito ke kontrole zveřejněných údajů o výkonu vibračního generátoru velikosti AA a AAA baterie. Tato kontrola potvrdila značné nadhodnocení možných výkonu generátoru této velikosti, které neodpovídá fyzikálně daným omezením.

Pro koncepci nového vibračního generátoru byl zvolen elektromagnetický indukční princip, mimo jiné i z důvodu využití tohoto principu pro již existující zařízení stejné kategorie, pro které taktéž nejsou dostupné přesné údaje o konstrukci a výkonu. Motivací tak bylo i zjistit reálné možnosti takového generátoru. Rezonanční obvod vyvíjeného generátoru je naladěn na 1,9 Hz, požadovaný výkon je minimálně 50 mW a maximální hmotnost je omezena na 250 g. Tyto poměrně náročné požadavky vedly obtížím se splněním některých limitů, a proto došlo k velké časové ztrátě v průběhu optimalizace konstrukce. První dvě testovaná konstrukční řešení byla zavržena v důsledku nesplnění některého stanoveného požadavku, třetí navržené řešení se zdá být použitelné, ovšem na jeho důkladné otestování již nezbyl dostatek času, a proto zůstalo u koncepčního návrhu.

Pro vytvoření simulačních modelů soustavy byl využit program MATLAB/Simulink, magnetická indukce v obvodu byl simulován za pomoci MKP v programu Ansys, a 3D modely mechanismů byly vytvořeny v CAD systému Inventor.

Vytvořený koncept generátoru může být dále rozvíjen a optimalizován, jelikož plný potenciál tohoto řešení dosud není zcela využit. V případě vytvoření a úspěšného otestování prototypu by byl získán užitečný, pravděpodobně i komerčně využitelný, zdroj v podstatě nevyčerpatelné energie.

9 REFERENCE

- [1] A study of vibration-based energy harvesting in activities of daily living. In *Pervasive computing technologies for healthcare, 2010 4th International Conference. 22-25 March 2010, Munich*. s. 1-4. ISBN 978-963-9799-89-9.
- [2] DANIELSSON, O.: *Design of a Linear Generator for Wave Energy Plant*. Upsalla, 2003. 41 s. Diplomová práce na Uppsala University School of Engineering. Vedoucí diplomové práce Mats Leijon.
- [3] DANIELSSON, O., THORBURN, K., ERIKSSON, M., LEIJON, M.: *Permanent magnet fixation concepts for linear generátor*. Uppsala University, Department for Electricity and Lightning Research, Neznámý rok.
- [4] ELMES, J., GAYDARZHIEV, V., MENSAH, A., RUSTOM, K., SHEN, J., BATARSHE, I.: Maximum Energy Harvesting Control for Oscillating Energy Harvesting Systems. In *Power Electronics Specialists Conference. PECS 2007. IEEE. 17-21 June 2007, Orlando*. s. 2792-2798. ISBN 978-1-4244-0654-8.
- [5] GRANSTROM, J., FEENSTRA, J., SODANO, H. A. FARINHOLT, K.: Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps. *Smart materials and structures*. Vol. 16, No. 5, October 2007, s. 1810 - 1820.
- [6] HADAŠ, Z.: *Mikrogenerátor jako mikromechanická soustava*. Brno, 2007. 98 s. Disertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého Učení Technického v Brně na ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Školitelé disertační práce doc. Ing. Vladislav Singule, Csc., doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, Csc.
- [7] KHALIGH, A., ZENG, P., ZHENG, C.: Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies – State of the Art. *IEEE Transactions on industrial electronics*. March 2010. Vol. 57, No. 3. s. 850-860. ISSN: 0278-0046
- [8] KIMOULAKIS, N. M., KLADAS, A. G., TEGOPOULOS, J. A.: Power Generation Optimization From Sea Waves by Using a Permanent Magnet Linear Generator Drive. *IEEE Transactions on magnetics*. June 2008, Vol. 44, No. 6. s. 1530-1533 ISSN: 0018-9464
- [9] KRIKKE, J.: Sunrise for energy harvesting products. *IEEE Pervasive computing*. Jan-Mar 2006. Vol. 4, No. 1. pp 4-5.
- [10] KURFÜRST, J.: *Optimalizace vibračního mikrogenerátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [11] KYMISSIS, J.; KENDALL, C.; PARADISO, J.; GERSHENFELD, N.: Parasitic power harvesting in shoes. *Wearable Computers, 1998. Digest of Papers. Second International Symposium on*, 19-20 Oct 1998. s.132-139. ISBN: 0-8186-9074-7

- [12] MATEU, L., MOLL, F.: Review of Energy Harvesting Techniques and Applications or Microelectronics. *Proceedings of the SPIE Microtechnologies for the New Millenium*. 2005.
- [13] MENINGER, S., MUR-MIRANDA, J.-O., AMIRTHARAJAH, R., CHANDRAKASAN, A., LANG, J.: *Vibration-to-Electric Energy Conversion*. IEEE Transactions on VLSI Systems. 2001. Vol. 9, No. 1. s. 64-76.
- [14] NASIRI, A., ZABALAWI, A., JEUTTER, D. C.: A Linear Permanent Magnet Generator for Powering Implanted Electronic Devices. *IEEE Transactions on power electronics*. January 2011. Vol. 26, No. 1. s. 192-199. ISSN: 0885-8993
- [15] PARADISO, J.A., STARNER, T.: Human Generated Power for Mobile Electronics. in *Piguet, C. (ed). Low-Power Electronics*, CRC Press, Chapter 45, 2004. s. 45-1 - 45-35.
- [16] ROCHA, J. G., GONÇALVES, M. L., ROCHA, P. F., SILVA, M. P., LANCEROS-MENDÉZ, S.: Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated ini Footwear. *IEEE Transactions on industrial electronics*. March 2010. Vol. 57, No. 3. s. 813-819. ISSN: 0278-0046
- [17] WANG, Y. C., SHI, D., SHEN, J. X., WANG, K., JIN, M. J.: Design and fabrication of a linear generátor for vibrafon energy harvesting. In *Sustainable Energy Technologies, 2010 IEEE International Conference. 6-9 December 2010, Kandy*. ISBN 978-1-4244-7192-8.
- [18] WILLIAMS, C. B., SHEARWOOD, C., HARRADINE, M. A., MELLOR, P. H., BIRCH, T. S., YATES, R. B.: Developement of electromagnetic micro-generator. *IEEE Proc.-Circuits Devices Syst*. December 2001. Vol 148, No. 6. s. 337-342.
- [19] WISCHKE, M., MASUR, M., GOLDSCHMIDTBOEING, F., WOIAS, P.: Piezoelectrically tunable electromagnetic vibrafon harvester. In *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2010 IEEE 23rd International Conference 24-28 Jan.2010. Wanchai, Hong Kong*. s. 1199-1202. ISBN 978-1-4244-5761-8.
- [20] YARKONY, N., SAYRAFIAN-POUR, K., POSSOLO, A.: Statistical Modelling of Harvestable Kinetic Energy for Wearable Medical Sensors. In *World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, 2010 IEEE International Symposium, 14-17 June 2010, Montreal*. s. 1-5. ISBN 978-1-4244-7264-2.
- [21] YUN, J., PATEL, S. N., REYNOLDS, M. S., ABOWD, G. D.: Design and Performance of an Optimal Inertial Power Harvester for Human-powered Devices. *IEEE Transactions on mobile computing*. July 2009. Vol. 8, No. 7. s. 1-16. ISSN: 1536-1233
- [22] ZORLU, Ö., TOPAL, E. T., KÜLAH, H.: A Vibration-Based Electromagnetic Energy Harvester Using Mechanical Frequency Up-Conversion Method. *IEEE Sensors journal*. February 2011. Vol. 11, No. 2. s. 481-488. ISSN: 1530-437X

- [23] BALL, Philip. *Power pack harness hickers' energy*. [online]. c2005, [cit 2011-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.nature.com/news/2005/050905/full/news050905-14.html>>.
- [24] DA COSTA, Christen. *Out of juice? Just strap on this knee brace*. [online]. publikováno 2008-02-11, [cit. 2011-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.gadgetreview.com/2008/02/out-of-juice-just-strap-on-this-knee-brace.html>>.
- [25] KUME, Hideyoshi. *Vibration-powered Generators replace AA, AAA batteries*. [online]. Publikováno 2010-07-16, [cit. 2011-03-05]. Dostupné z WWW: <http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EN/20100716/184262/>.
- [26] LEWIS, Joyce. *ECS researches develop clothing that packs a powerful punch*. [online]. Publikováno 2010-08-18, [cit. 2011-03-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.ecs.soton.ac.uk/about/news/3356>>.
- [27] *nPower PEG*. [online]. [cit. 2011-02-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.npowerpeg.com/>>.
- [28] *Pavegen Systems*. [online]. c2011, [cit. 2011-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.pavegensystems.com/index.php>>.
- [29] *POWERleap*. [online]. c2009, [cit. 2011-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://powerleap.net/index.html>>.
- [30] RICHARD, Michael Graham. Japan: *Producing electricity from train station ticket gates*. [online]. c2006, [cit. 2011-03-16]. Dostupné z WWW: <http://www.treehugger.com/files/2006/08/japan_ticket_gates.php>.
- [31] SCHWARTZ, John. *Taking people power to new level*. [online]. c2008, [cit. 2011-03-15]. Dostupné z WWW: <http://www.nytimes.com/2008/02/08/us/08knees.html?_r=2&oref=slogin>.
- [32] *The Flexible Integrated Energy Device*. [online]. c2008, [cit 2011-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.scienceimage.csiro.au/index.cfm?event=site.image.detail&id=7661>>.
- [33] ZYGA, Lisa. *Backpack straps harvest energy to power electronics*. [online]. c2007, [cit. 2011-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.physorg.com/news108897656.html>>.

10 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_p	příčné zrychlení	$[\text{m.s}^{-2}]$
A_v	budící zrychlení	$[\text{m.s}^{-2}]$
B	magnetická indukce	$[\text{T}]$
b_e	elektromagnetické tlumení	$[\text{N.s.m}^{-1}]$
b_k	kritické tlumení	$[\text{N.s.m}^{-1}]$
b_m	mechanické tlumení	$[\text{N.s.m}^{-1}]$
F	elektromagnetická tlumící síla	$[\text{N}]$
F_N	normálová síla	$[\text{N}]$
F_t	třecí síla	$[\text{N}]$
f	součinitel tření	$[1]$
k	tuhost	$[\text{N.m}^{-1}]$
L	indukčnost cívky	$[\text{H}]$
l	délka závitů cívky	$[\text{m}]$
m	hmotnost	$[\text{kg}]$
N	počet závitů cívky	$[1]$
P	výkon	$[\text{W}]$
P_{max}^{el}	maximální generovaný elektrický výkon	$[\text{W}]$
R	elektrický odpor zátěže	$[\Omega]$
R_C	elektrický odpor cívky	$[\Omega]$
S	průřez vodiče cívky	$[\text{m}^2]$
u_i	indukované napětí	$[\text{V}]$
v	rychlost	$[\text{m.s}^{-1}]$
x	poloha	$[\text{m}]$
ζ_0	poměrný útlum	$[1]$
ζ_e	elektromagnetický útlum	$[1]$
η	součinitel naladění	$[1]$
ρ	měrný elektrický odpor	$[\Omega .\text{m}]$
Ω	rezonanční frekvence	$[\text{rad.s}^{-1}]$
ω	budící frekvence	$[\text{rad.s}^{-1}]$

11 SEZNAM PŘÍLOH NA CD

P1 – data z měření zrychlení

P1.1	pokus 1 - rameno
P1.2	pokus 2 - zapesti
P1.3	pokus 3 - nart
P1.4	pokus 4 - nart
P1.5	pokus 5 - nart
P1.6	pokus 6 - holen
P1.7	pokus 7 - stehno
P1.8	pokus 8 - stehno rychla chuze
P1.9	pokus 9 - batoh
P1.10	pokus 10 - batoh
P1.11	pokus 11 - paze
P1.12	pokus 12 - holen
P1.13	pokus 13 - stehno
P1.14	pokus 14 - holen
P1.15	pokus 15 - stehno
P1.16	pokus 16 – batoh zatizeny
P1.17	pokus 17 – holen jiné upevneni
P1.18	pokus 18 - pata
P1.19	pokus 19 - pata

P2 – použité modely a skripty MATLAB/Simulink

P2.1	skript Smilek_BP_2011_rozvaha.m
P2.2	skript Smilek_BP_2011_rozvaha_3D_utlum.m
P2.3	skript Smilek_BP_2011_rozvaha_3D_utlum_treni.m
P2.4	skript Smilek_BP_2011_rozvaha_baterka.m
P2.5	skript Smilek_BP_2011_rozvaha_navrh_treni_final.m
P2.6	model Smilek_BP_2011_rozvaha_model.mdl
P2.7	model Smilek_BP_2011_rozvaha_baterka_simulink.mdl
P2.8	model Smilek_BP_2011_navrh_treni.mdl

P3 – grafy energetické rozvahy

P3.1	graf 0,3g_1,9Hz_amp3cm.fig
P3.2	graf 0,3g_1,9Hz_amp5cm.fig
P3.3	graf 0,3g_1,9Hz_amp7cm.fig
P3.4	graf 0,3g_1,9Hz_neomezena_amp.fig
P3.5	graf 1,3g_0,9Hz_amp3cm.fig
P3.6	graf 1,3g_0,9Hz_amp5cm.fig
P3.7	graf 1,3g_0,9Hz_amp7cm.fig
P3.8	graf 1,3g_0,9Hz_neomezena_amp.fig

